

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta Strojní

Studijní program M 2301- Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Mechanizované svařování tupých svarů aluminidu železa metodou 141

Mechanized welding of butt welds of iron aluminides by method 141

Ondřej Horák

KSP – SM - 549

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Heinz Neumann, CSc. – *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce:

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	67
Počet tabulek	18
Počet obrázků	61

Datum: 5. 6. 2009

ORIGINÁLNÍ ZADANÍ DP

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství
Diplomant: Ondřej Horák
Téma práce: Mechanizované svařování tupých svarů aluminidu železa
metodou 141

Mechanized welding of butt welds of iron aluminides by
method 141

Číslo DP: KSP - SM - 549
Vedoucí DP: doc. Ing. Heinz Neumann, CSc. – *TU v Liberci*
Konzultant:

Abstrakt:

Cílem této diplomové práce je realizovat experimentální program, při kterém zhodnotím vliv vybraných technologických parametrů svařování na tvar svarové lázně, strukturu a vlastnosti svarů aluminidu železa použitím metody svařování WIG. Celý proces svařování bude zaznamenáván programem WeldMonitor 3.5. Tyto poznatky by měli přispět ke zkvalitnění simulací v programu SYSWELD.

Abstract:

Purpose of this thesis is to implement experimental program, which will give us a influence of specifics technological welding parametrs on form of weld pool, structure and welds characteristics of iron aluminides by using WIG welding method. Whole welding process will be recording by program WeldMonitor 3.5. This pieces of knowledge should gain more quality results from SYSWELD simulations.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. června 2009

.....
Ondřej Horák
Na Mušce 1028
53401 Holice

Poděkování

Tímto bych chtěl velice poděkovat za velmi cenné rady při psaní diplomové práce a za pomoc při řešení experimentální části vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Heinzu Neumannovi, CSc.

Také bych rád poděkoval svým rodičům za to, že mě po celou dobu studia podporovali.

OBSAH

1 Úvod [1], [2]	9
2 Teoretická část	10
2.1 Metoda svařování 141 dle ČSN EN ISO 4063 [2], [3], [4], [5]	10
2.1.1 Princip [2], [3], [6]	10
2.1.2 Zdroje napájení [2], [3], [4], [5]	11
2.1.3 Svařovací proudy [2], [3], [4], [7]	13
2.1.4 Elektrody [2], [3], [4], [7]	15
2.1.4.1 Druhy elektrod dle ČSN EN 26 848 [2], [4]	16
2.1.5 Ochranné plyny [3], [4]	18
2.1.6 Hodnocení metody WIG [2]	19
2.1.6.1 Výhody	19
2.1.6.2 Nevýhody	20
2.1.7 Použití v aplikacích [2], [3]	20
2.2 Aluminidy železa [8], [9]	21
2.2.1 Vlastnosti [8]	21
2.2.2 Struktura fází aluminidu železa v okolí složení Fe_3Al [8], [9]	22
2.2.3 Mikrostruktury aluminidu železa [8]	22
2.2.4 Svařitelnost [8]	23
2.2.5 Mechanické vlastnosti [8]	24
2.2.6 Příměsi [8], [9]	27
2.2.7 Výroba slitin na bázi aluminidu železa [9]	28
2.2.7.1 Tavení slitin na bázi Fe_3Al	28
2.2.8 Ověřovací zkoušky svařování aluminidu železa na KSP [10]	29
2.3 Monitorování a dokumentace procesu svařování pomocí WeldMonitoru	
3.5 [11]	30
2.3.1 WeldMonitor hardware	30
2.3.1.1 Snímače	30

2.3.1.2 Sledované veličiny	31
2.3.2 WeldMonitor software	32
2.4 Vady a jakosti tupých svarů dle ČSN EN ISO 5817 [4], [12]	32
3 Experimentální část	34
3.1 Zaměření a cíl práce	34
3.2 Laboratoř svařování	34
3.2.1 Svařovací zdroj Migatronic Navigator 3000 AC/DC	36
3.2.2 Metalografická laboratoř	37
3.2.3 Ochranný plyn	37
3.2.4 Tavidlo OK FLUX 10.47	37
3.2.5 Svařovaný materiál	37
3.3. Svařování vzorků	38
3.3.1 Svar č. 1	39
3.3.1.1 Průběh svařování	40
3.3.1.2 Zhodnocení svařeného vzorku	42
3.3.2 Svar č. 2	45
3.3.2.1 Průběh svařování	46
3.3.2.2 Zhodnocení svařeného vzorku	48
3.3.3 Svar č. 3	53
3.3.3.1 Průběh svařování	54
3.3.3.2 Zhodnocení svařeného vzorku	56
3.3.4 Svar č. 4	60
3.3.4.1 Průběh svařování	60
3.3.4.2 Zhodnocení svařeného vzorku	62
4 Závěr	65
5 Seznam použité literatury	67

Seznam použitých zkratk a symbolů

MMA	Manual Metal Arc Welding – Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
FCAW	Flux-Cored Arc Welding - Ruční obloukové svařování plněnou elektrodou
SAW	Submerged Arc Welding – Svařování pod tavidlem
MIG	Metal Inert Gas – Svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
MAG	Metal Activ Gas - Svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
FCAG	Flux-Cored Wire Metal Arc Welding with Inert Gas Shield - Ruční obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu
WIG – TIG	Wolfram Inert Gas – Tungsten Inert Gas – Svařování netavící se (wolframovou) elektrodou v inertním plynu
ΔU	Změna napětí [V]
ΔI	Změna proudu [A]
DC	Direct Current – Stejnosměrný proud
AC	Alternating Current – Střídavý proud
HF	High Frequency - Vysokofrekvenční
Fe_3Al	Aluminid železa
at. %	atomové procento
WPS	Welding Procedure Specification – Specifikace postupu svařování
pWPS	preliminary Welding Procedure Specification – Předběžná specifikace postupu svařování
WI	Work Instruction – Pracovní instrukce
PATIG	Aeroslový aktivátor pro svařování metodou TIG
Q	Vnesené teplo [kJ/mm]
η	Účinnost oblouku [1]
U	Napětí oblouku [V]
I	Proud oblouku [A]
v_s	Rychlost svařování [mm/s]
PA	Poloha svařování dle ISO 6947

1 Úvod [1], [2]

Historie svařování nás zavede až do starověkého Řecka, tento vynález se připisuje Řeku Glaukovi (688-600 př.n.l.). Ve středověku, kdy se rozvíjelo kovářství, bylo vyrobeno mnoho předmětů takzvaným kovářským svařováním. Svařování, tak jak je známé dnes, bylo objeveno až v 18. století. Nejprve to bylo řezání a svařování plynem, to bylo podmíněno objevem acetylenu v roce 1836. Svařování elektrickým obloukem bylo podmíněno vynálezem elektrického generátoru. První, kdo použil teplo elektrického oblouku ke svařování byl zřejmě Auguste De Meritens ve Francii. Bylo to v roce 1881 a týkalo se to svařování olověných desek pro akumulátory. Avšak první patent získal jeho žák Nikolaj Nikolajevič Benardos pracující ve Francii. Bylo to svařování uhlíkovými elektrodami, které se rozšířilo koncem 19. a začátkem 20. století. Dokázal rovněž možnost svařování pod vodou. V roce 1926 obdrželi patent H. M. Howard a P. K. Devers na svařování v ochranné atmosféře argonu a hélia. Tento způsob svařování byl dopracován ve čtyřicátých letech minulého století a používán pro svařování hořčíkových a hliníkových slitin a nerezové oceli. V roce 1948 byl podobný způsob odzkoušen s ocelovou tenkou elektrodou ve formě drátu. K význačnému objevu došlo v roce 1953, když Ljubavskij a Novošilov oznámili použití ocelových elektrod v atmosféře CO₂ [1].

Nejpoužívanější metody obloukového svařování současnosti v souladu s označením dle ČSN EN ISO 4063:

- 111 – MMA – *Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou*
- 114 – FCAW – *Ruční obloukové svařování plněnou elektrodou (trubičkový drát) bez ochranného plynu*
- 12 (121) – SAW – *(automatické) svařování pod tavidlem*
- 131 – MIG – *Svařování tavící se elektrodou v inertním plynu*
- 135 – MAG – *Svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu*
- 136 – MAG – *Svařování plněnou elektrodou (trubičkovým drátem) v aktivním plynu*
- 137 – FCAG – *Svařování plněnou elektrodou (trubičkovým drátem) v inertním plynu*
- 141 – WIG – *Svařování netavící se elektrodou (wolframovou) v inertním plynu*

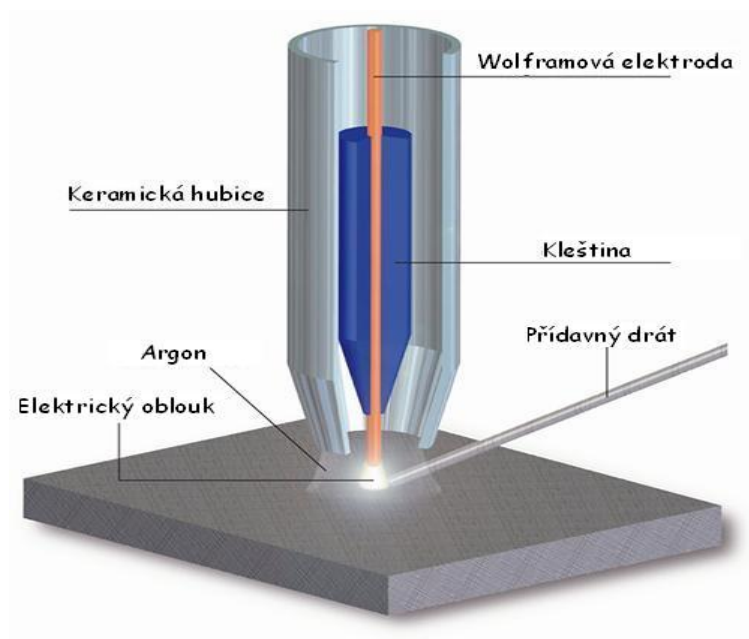
2 Teoretická část

2.1 Metoda svařování 141 dle ČSN EN ISO 4063 [2], [3], [4], [5]

Svařování metodou WIG se proslavilo ve 40. letech minulého století, díky jejímu využití pro svařování hořčíku a hliníku. Použitím ochranné atmosféry namísto strusky k ochraně svarové lázně se tento způsob svařování stal velice atraktivní náhradou ručního obloukového svařování. WIG svařování sehrálo hlavní roli v rozhodnutí začít používat hliník pro vysoce kvalitní svařované konstrukční aplikace.

2.1.1 Princip [2], [3], [6]

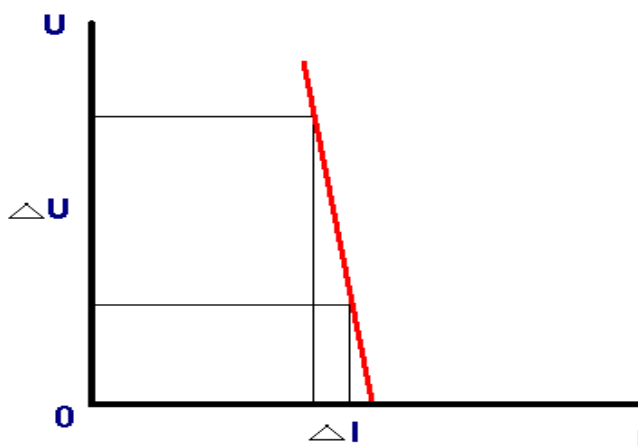
Při WIG svařování (*obr. 2.1*) je oblouk vytvořen mezi wolframovou elektrodou a svařovanou součástí v ochranném prostředí argonu, nebo helia. Malý intenzivní elektrický oblouk poskytnutý špičatou elektrodou je ideální pro vysokou kvalitu a precizní svařování. Působením teploty a elektrického proudu dojde k ionizaci plynu a následnému zapálení a hoření elektrického oblouku za současného uvolnění značného množství energie. Právě tuto energii využíváme pro tavení svařovaného materiálu. Svařování může být provedeno buď pouze roztavením a slitím základních materiálů dohromady, bez použití přídavného materiálu, nebo s přidáním přídavného materiálu podobného složení jako má základní materiál. Při ručním svařování WIG drží svářeč v jedné ruce hořák a ve druhé drát a přidává jej do lázně po kapkách dle potřeby. WIG svařování lze také částečně mechanizovat, nebo úplně automatizovat. Při částečné mechanizaci stále svářeč v ruce drží hořák, ale drát je podáván bovdenem pomocí speciálního podavače do oblouku. Posun drátu je ovládán svářečem, respektive tlačítkem na hořáku. Při úplné automatizaci je hořák upnut v robotu a vše je řízeno automaticky.



Obr. 2.1: Princip svařování metodou WIG [6]

2.1.2 Zdroje napájení [2], [3], [4], [5]

Zdroje napájení pro toto svařování jsou stejnosměrné (DC) nebo střídavé (AC) (obr. 2.3). DC zdroj je usměrňovač se sítovým transformátorem nebo invertor se strmou charakteristikou. Při strmé charakteristice (obr. 2.2) dochází při větších změnách napětí (ΔU) na oblouku jen k minimálním změnám svařovacího proudu (ΔI). Napětí na oblouku je úměrné délce oblouku. Takže i při velké změně délky oblouku díky držení hořáku svářečem v ruce se svařovací proud mění jen minimálně.



Obr. 2.2: Strmá statická V-A charakteristika WIG svářečky [2]

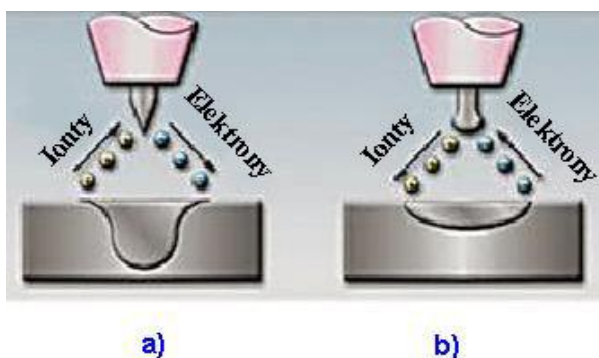
Používání DC zdrojů pro WIG svařování narůstá. Výhody použití jsou snadnější zapálení oblouku, hodnoty na výstupu lze přednastavit pro mechanizovaný provoz. Větší stabilita těchto zdrojů umožňuje velmi nízké proudy pro mikro svary a velkou měrou nahradily využití plasmy v této činnosti. AC zdroj je nejčastěji svařovací transformátor upravený na svařování WIG pomocí výkonových elektronických prvků, které zvyšují strmost statické charakteristiky. Používá se u svařování materiálů, jako je hliník, které mají na povrchu přilnavou vrstvu oxidů. Díky přepínání mezi kladnou a zápornou polaritou na elektrodě, dochází při kladné polarizaci elektrody k odstranění oxidů a vyčištění povrchu materiálu. Nevýhoda při použití tohoto zdroje je ta, že oblouk je více rozptýlený. U DC zdrojů je oblouk zapálen škrábnutím o povrch materiálu a vytvořením zkratu. Ale je tady riziko, že se elektroda může přilepit k povrchu a způsobit, že svar bude obsahovat wolfram. Toto riziko lze snížit tím, že zkrat je vytvořen velmi malým proudem. AC zdroje zase musí být vždy vybaveny bezdotykovým HF startem, protože startovat AC WIG škrábnutím je velice obtížné až nemožné. A také musí být vybaveny zařízením, které stabilizuje oblouk při průchodu napětí nulou. Některé tyto zdroje proto mají neustále zapnutý HF ionizátor.



Obr. 2.3: Ukázka invertorových zdrojů PI 320A, 400A, 500A pro průmyslový WIG DC, WIG AC/DC [5]

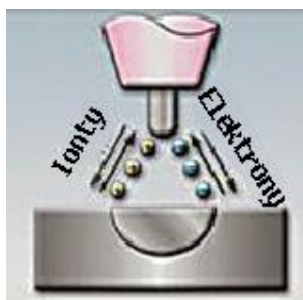
2.1.3 Svařovací proudy [2], [3], [4], [7]

➤ *Svařování stejnosměrným proudem* - Je to základní způsob svařování metodou WIG. Při tomto typu můžeme použít přímou nebo nepřímou polaritu (obr. 2.4). Při použití přímé polarity je elektroda připojena k zápornému pólu zdroje a materiál ke kladnému. Při svařování nepřímou polaritou je zapojení opačné, avšak v praxi se výhradně používá právě přímého spojení. DC zdroje produkují elektrický oblouk s nerovnoměrným rozložením tepla. Právě při přímé polaritě je největší část vyprodukovaného tepla ve svařované součásti, asi $2/3$, zbylá $1/3$ připadá na elektrodu. Tím pádem je elektroda méně zatěžovaná a také svarová lázeň má mnohem větší hloubku závaru. Tímto způsobem se dají svařovat všechny typy ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Tento způsob zapojení se dá použít i pro svařování hliníku v ochranné atmosféře směsi argonu a nejméně 75% hélia. Díky vysoké vodivosti hélia se do svarové lázně přenáší veliké množství tepla, které umožňuje roztavení i povrchových oxidů. Využití je hlavně pro renovace a opravy rozměrných a silnostěnných hliníkových odlitků nebo svarků. Bohužel, ale přímá polarita neumožňuje čistící efekt oblouku. Pro stabilní oblouk je nutné u přímé polarity špičku elektrody brousit. Při nepřímé polaritě, bude elektroda vystavena velkému tepelnému namáhání a hrozí její odtavení. Ale i přesto se v praxi používá, právě kvůli čistícímu efektu oblouku pro svařování materiálů (potažených silnou oxidickou vrstvou) malé tloušťky, které se dají svařovat malými proudy i tak, ale za stálého chlazení elektrody.



Obr. 2.4: WIG svařování DC - a) přímá polarita, b) nepřímá polarita [7]

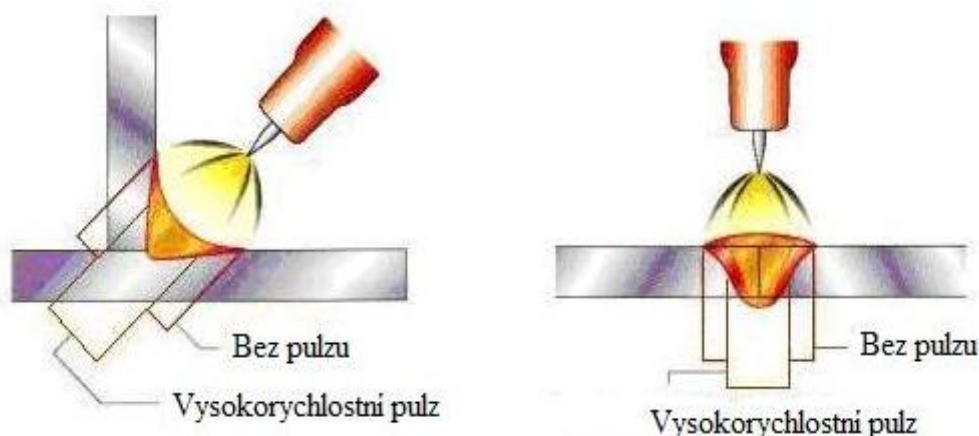
➤ *Svařování střídavým proudem* – Zde se polarita mění v pravidelných intervalech. Střídavý proud nám umožní využít výhod přímé a nepřímé polarity najednou (obr. 2.5). Používá se u svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin z důvodu čistícího účinku. Ten vzniká při zapojení elektrody na kladný pól. Na materiálu se vytvoří katodová skvrna, která není stabilní a pohybuje se na místa pokrytá oxidy. Oxidy hliníku Al_2O_3 chrání povrch před další oxidací, ale zabraňují nám kvůli jeho vysoké teplotě tání metalurgickému spojení. Místa pokrytá oxidy mají nižší emisní energii pro emisi elektronů a po zasažení katodovou skvrnou se oxidy lépe odpaří. Další forma čistícího účinku se projevuje při rozložení ochranného plynu argonu na kladné ionty a elektrony. Ionty působí na oxidy mechanickým účinkem a dynamickým účinkem tohoto proudu dochází ke stažení vrstvy oxidu ke kraji svarové lázně. Při kladném zapojení elektrody vzniká pouze malý závar, vysokého závaru dosahujeme pouze tehdy, když je elektroda zapojena na záporný pól zdroje. Dá se teda říci, že periodicky dochází ke střídání fází svařování a čištění.



Obr. 2.5: WIG svařování AC [7]

➤ *Svařování pulzním proudem* - Je to nejnovější varianta svařování metodou WIG (obr. 2.6), při které se proud mění pravidelně s časem mezi dvěma proudovými hladinami a mezi základním proudem I_z a impulzním proudem I_p . Průběh proudu může být pravoúhlý, lichoběžníkový, sinusový nebo jiný. Základní proud má hodnotu 10 až 15 A a zajišťuje pouze ionizaci oblouku v čase t_z . Když je doba základního proudu delší než dvojnásobek doby pulsu tak dochází k úplnému zatuhnutí svarové lázně. To je výhodné u svařování vysokolegovaných ocelí. Impulsní proud natavuje svarovou lázeň i přídavný materiál během času t_p . Rozměr svarové lázně je dán především hodnotou amplitudy impulsního proudu a dobou trvání pulsu. Průměrná hodnota svařovacího proudu je při tomto svařování menší než u

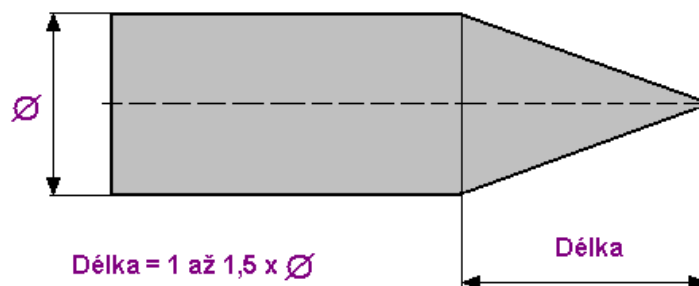
svařování konstantním proudem a díky tomu svary mají menší tepelně ovlivněnou oblast a vykazují výborné plastické vlastnosti. Pulzní svařování lze aplikovat jak na svařování stejnosměrným proudem, tak na svařování střídavým proudem.



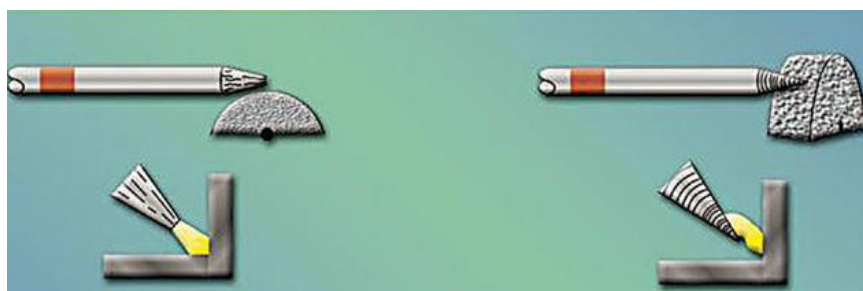
Obr. 2.6: Ukázka rozdílnosti svarů s pulzem a bez pulzu [2]

2.1.4 Elektrody [2], [3], [4], [7]

Elektrody pro svařování pomocí DC zdroje jsou z čistého wolframu s 1 až 4% thoria pro zlepšení zapálení oblouku. Alternativní přísady jsou oxidy céru a lanthanu, které dávají vyšší výkon. Při použití AC zdrojů je elektroda vystavena mnohem větším teplotám. Proto se jako přísada k wolframu používá zirkon, toto spojení snižuje opotřebení elektrody. Vyrábějí se standardně v průměrech 1,0; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0; 4,8; 6,0; 6,4 mm a délkách 50, 75, 150, 175 mm. Doporučuje se, aby použitý průměr byl zároveň vzdáleností elektrody od základního materiálu, délka oblouku by měla být po celou dobu svařování stejná. Průběh svařování a kvalita svaru je velice ovlivněna tvarem konce elektrody. Délka špičky by měla být 1 až 1,5 násobek průměru elektrody (obr. 2.7). Po obroušení konce špičky, musí dojít k jejímu otupení, čímž se významně sníží její zatížení a prodlouží její životnost. Elektroda se musí brousit tak, aby vrypy na elektrodě byly rovnoběžně s podélnou osou, jinak by vznikl nestabilní oblouk (obr. 2.8).



Obr. 2.7: Ukázka úpravy špičky elektrody [2]



Obr. 2.8: Vliv úpravy špičky elektrody na kvalitu oblouku [7]

2.1.4.1 Druhy elektrod dle ČSN EN 26 848 [2], [4]

Wolframové elektrody pro WIG svařování lze rozdělit podle příměsí. Pro snadné odlišení jednotlivých typů se používá barevného značení vždy jednoho konce elektrody (obr. 2.9).

Značení elektrod:

- První písmeno W značí wolfram jako hlavní prvek elektrod
- Druhé písmeno značí přísadu oxidu
- Druhé písmeno P u elektrody WP značí čistý wolfram
- Číslo značí 10 násobek obsažené koncentrace oxidu

➤ **WP** – Obsahují čistý wolfram 99,8%. Elektroda je značena zelenou barvou. Tato elektroda je vhodná pro svařování hliníkových slitin střídavým proudem. Není vhodná pro svařování stejnosměrným proudem a jako jediný typ elektrod pro WIG svařování se nebrousí do špičky.

➤ **WT 10, 20, 30, 40** – Obsahují thorium. Barevné značení elektrod se mění dle velikosti obsahu thoria od 1% (žlutá), 2% (červená), 3% (fialová) až do 4%

(oranžová). Thorium způsobuje snížení výstupní práce a zvýšení emise elektronů. Se stoupajícím obsahem thoria se zlepšují zapalovací vlastnosti, trvanlivost, proudová zatížitelnost. Hlavní použití těchto elektrod je při svařování vysoce legovaných a nerezových ocelí stejnosměrným proudem, zde vykazují výborné vlastnosti.

➤ **WC 20** – Obsahují 2% céru, značí se šedou barvou. Tyto elektrody jsou univerzální pro téměř všechna použití. Používají se pro svařování stejnosměrným i střídavým proudem. Jsou vhodné pro svařování nelegovaných i legovaných ocelí, slitin hliníku, slitin titanu, niklu, mědi a hořčíku. Mají podobné vlastnosti jako WT elektrody, což je proudová zatížitelnost a dobrá trvanlivost.

➤ **WL 10, 15, 20** – Obsahují lanthan a barevné značení záleží na velikosti obsahu lanthanu, 1% (černá), 1,5% (zlatá) a 2% (modrá). Jsou to universální elektrody pro téměř všechna použití při svařování střídavým tak i stejnosměrným proudem. Oproti WC elektrodám jsou lepší v použití v oblasti nízkých proudů. Vyšší podíl lanthanu usnadňuje zapalování, zejména při automatizovaném svařování.

➤ **WZ 08** – Obsahují zirkon, značí se bílou barvou. Zirkon minimalizuje tvorbu wolframových vměstků ve svarovém kovu. Používá se hlavně pro střídavý proud a tím pádem pro svařování hliníkových materiálů. Pro stejnosměrný proud je lze použít jen výjimečně.



Obr. 2.9: Ukázka wolframových elektrod pro WIG svařování [2]

Tab. 2.1: Doporučené proudové zatížení wolframových elektrod [4]

Průměr elektrody [mm]	Stejnoseměrný proud [A]		Střídavý proud [A]	
	Přímá polarita (- pól na elektrodě)		WP	WT, WL, WC, WZ
	WP	WT, WL, WC, WZ		
0,5	Do - 20	Do - 20	2 - 15	2 - 15
1,0	20 - 75	20 - 80	10 - 50	15 - 60
1,6	75 - 140	70 - 150	30 - 70	60 - 100
2,0	120 - 170	100 - 180	40 - 90	70 - 130
2,4	159 - 200	130 - 225	50 - 110	80 - 160
3,0	170 - 240	160 - 250	80 - 150	120 - 200
3,2	200 - 260	180 - 275	100 - 170	140 - 220
4,0	250 - 320	250 - 350	150 - 225	180 - 275
4,8	280 - 450	300 - 500	180 - 300	250 - 400
5,0		320 - 530	220 - 320	260 - 420
6,4		400 - 650	270 - 400	300 - 500

Pozn. Při zapojení nepřímé polarity vydrží elektrody zhruba 10% proudu přímé polarity

2.1.5 Ochranné plyny [3], [4]

Zabezpečují ochranu netavicí se elektrody, svarové lázně a jejího okolí proti škodlivým účinkům okolního vzduchu a také vytváří vhodné podmínky pro vytvoření oblouku. Ochranná atmosféra se volí dle materiálu, který se bude svařovat.

➤ *Argon* - Je to nejčastěji používaný ochranný plyn, který se používá pro svařování široké škály materiálů včetně oceli, nerezové oceli, hliníku a titanu.

➤ *Argon + 2 až 5% H₂* - Přidáním vodíku do argonu vzniká plyn, který mírně zlepšuje produkci svarů bez povrchové oxidace. Vodík se může používat jen pro svařování vysoce legovaných austenitických a austeniticko-feritických CrNi ocelí, nebo niklu a jeho slitin, protože by mohl vyvolat u uhlíkových ocelí porositu.

➤ *Hélium* - Pro svařování materiálů s větší tepelnou vodivostí a větších tloušťek, především mědi a jejích slitin.

➤ *Směs hélia a argonu* - Přidáním hélia do argonu vzrůstá teplota oblouku. Tímto podporujeme větší rychlost svařování a větší hloubku závaru. Nevýhodou použití hélia nebo směsi hélia a argonu je vysoká cena a obtížné zapálení oblouku. Použití je především pro svařování mědi, hliníku ručním způsobem.

➤ *Směs argonu s dusíkem* - Obsah dusíku se pohybuje kolem 10%, slouží pro svařování mědi a jejich slitin jelikož přenáší do svarové lázně větší podíl tepla.

➤ *Formovací plyn pro ochranu kořene svaru* - Používá se pro ochranu kořene a vysoko vyhřáté oblasti okolního základního materiálu před oxidací. Při svařování vysokolegovaných austenitických ocelí a nikových slitin se může jako formovací plyn použít směs argonu a vodíku nebo dusíku.

2.1.6 Hodnocení metody WIG [2]

2.1.6.1 Výhody

Největší výhodou je výborná kontrola nad svarovou lázní. Protože na rozdíl od jiných metod obloukového svařování zde nedochází k neustálému dodávání přídavného materiálu do svarové lázně, můžeme mnohem lépe kontrolovat svarovou lázeň a tím vlastnosti svarového spoje. Touto metodou lze svařovat úplně bez přídavného materiálu a to je velice výhodné protože svarový kov má shodné chemické složení jako základní materiál. Nebo můžeme jako přídavný materiál použít odstřížek nebo úlomek základního materiálu a to nám opět zajistí shodné chemické složení svarového kovu. Další výhodou je vysoká teplota oblouku, která umožňuje svařování vysokolegovaných ocelí. Jelikož je teplotní pole velice úzké nedochází k tepelnému ovlivnění základního materiálu v širokém pásmu okolo svaru a dosáhneme velké hloubky závaru. Ochrana před škodlivými účinky vzduchu je poskytnuta inertními plyny. Mezi kladné vlastnosti patří i příznivé tvarování housenky na povrchu i v kořeni svaru a také svařování velmi tenkých materiálů, při kterém je možné použít malé proudy v jednotkách ampér, v extrémních případech můžeme svařovat i kovové fólie proudy menšími než 1A.

2.1.6.2 Nevýhody

Mezi zásadní nevýhody této metody svařování patří vysoká technická náročnost na svařovací zařízení. Zařízení pro WIG svařování jsou komplikovanější a dražší než svářečky pro jiné metody svařování. Hlavně to platí pro AC svářečky. Největší nevýhodou je však malá produktivita tohoto svařování, proto se nehodí pro velkosériovou výrobu jednoduchých svařenců, ale hlavně pro složité konstrukce.

2.1.7 Použití v aplikacích [2], [3]

WIG svařování je využíváno ve všech průmyslových sektorech, ale hlavní využití je pro vysoce kvalitní svařování, tvarově složité konstrukce, zejména trubek (obr. 2.10) z hliníkových materiálů a nerez ocelí, kde se kromě ručního svařování používá svařování orbitální. Při ručním svařování je malý oblouk ideální pro svařování tenkých plechů nebo pro kontrolovaný závar trubek. Při orbitálním svařování je spoj proveden oběhem svařovacího hořáku kolem osy svařovaných částí. Protože rychlost svařování metodou WIG je malá, pro silnější materiály a také pro svary silnostěnných trubek se preferuje svařování metodou MIG. Nebo se svaří pouze kořenová vrstva a další vrstvy se zhotovují produktivnější metodou.



Obr. 2.10: Ukázka různých svarů metodou WIG [2]

2.2 Aluminidy železa [8], [9]

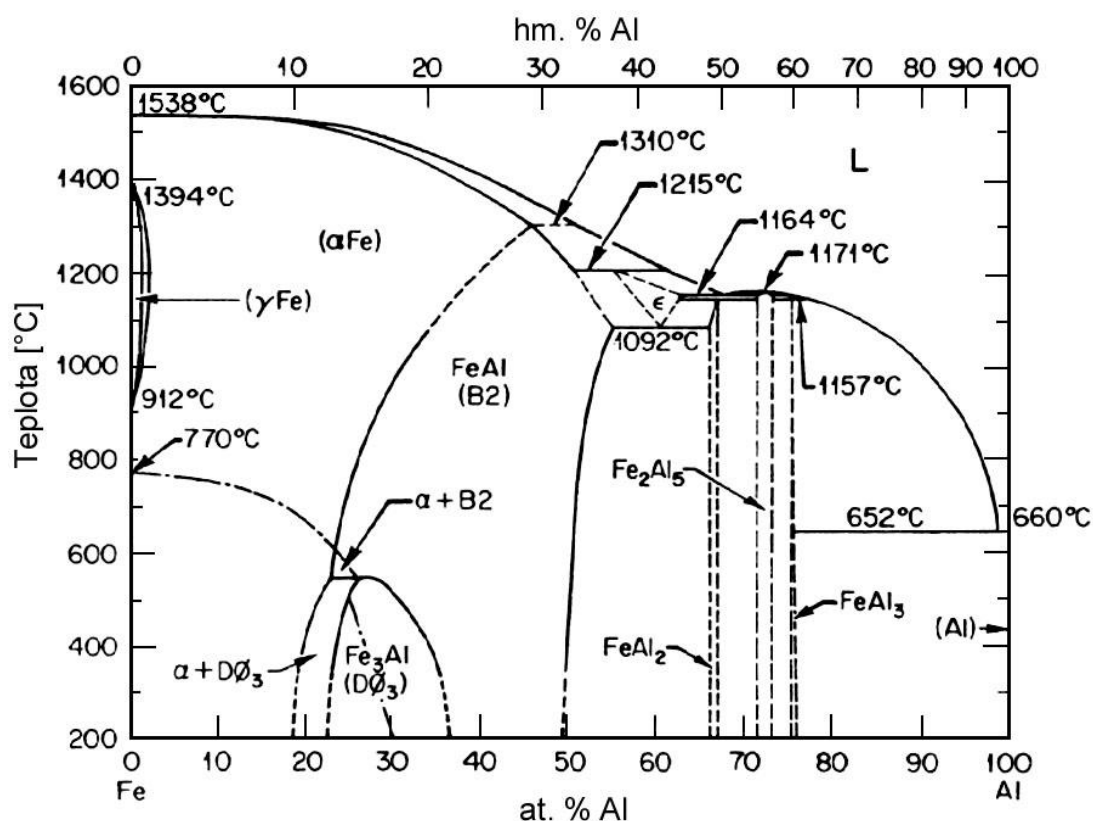
Zájem o aluminidy železa se datuje od třicátých let minulého století, kdy vyšly najevo výborné korozivzdorné vlastnosti těchto slitin s více než 18at.% hliníku. Tyto slitiny mají relativně nízké materiálové náklady, nižší spotřebu prvků jako je Cr, Ni a menší hmotnost než nerezové oceli. Pevnost v tahu je srovnatelná s mnoha ocelmi. Tyto vlastnosti vedly k uvažování o použití aluminidů železa v mnoha aplikacích. Avšak limitovaná tažnost při běžné teplotě okolí a velmi výrazný pokles pevnosti při teplotě 600°C a vyšší se staly hlavním strašákem pro jejich využití v mnoha konstrukčních aplikacích. Současné studie poukazují, že zlepšení tažnosti lze dosáhnout úpravou složení a mikrostruktury. V minulých letech bylo vyvinuto hodně úsilí k porozumění a vylepšení metalurgických vlastností aluminidů železa s cílem produkovat pevné, tažné, korozně odolné materiály pro konstrukční aplikace.

2.2.1 Vlastnosti [8]

Nejzvláštnější a nejdůležitější vlastností aluminidů železa obsahujících více než 18at.% hliníku je jejich korozní odolnost v oxidačním prostředí, v prostředí obsahujícím síru a také částečně při zvýšených teplotách. Avšak tyto slitiny mají omezenou tažnost při běžné teplotě prostředí a nedostatečnou pevnost při teplotách kolem a nad 600°C. Přísady jako jsou Ti, Si, Nb, Mo, Zr, mohou zvýšit pevnost za tepla. Hlavní uplatnění je v aplikacích, kde je velice žádoucí korozní odolnost a zde mají právě potenciál vytlačit mnoho ocelí a slitin na bázi niklu. Mezi další nevýhody patří křehkost při pokojové teplotě díky atomům vodíku, jako výsledku reakce mezi vlhkostí vzduchu a hliníku na povrchu. Teplotní roztažnost je porovnatelná s ocelmi do 800°C nad touto teplotou je už mírně větší. Koeficient teplotní roztažnosti narůstá s nárůstem koncentrace hliníku ve slitině. Magnetické vlastnosti silně závisí složení hliníku a tepelném zpracování. Slitiny s méně než 20at.% hliníku jsou všechny feromagnetické a magnetizace se snižuje s nárůstem hliníkové složky.

2.2.2 Struktura fází aluminidu železa v okolí složení Fe_3Al [8], [9]

Fázový diagram binárního systému Fe-Al (obr. 2.11) obsahuje řadu intermetalických fází, z nichž pro konstrukční aplikace jsou nejdůležitější: tuhý roztok α , uspořádané struktury B2 a D0₃ zobrazené ve fázovém diagramu. Slitina nabývá různých struktur v závislosti na teplotě a složení. Jsou to neuspořádaný tuhý roztok hliníku v železe a dvě uspořádané fáze B2 a D0₃.

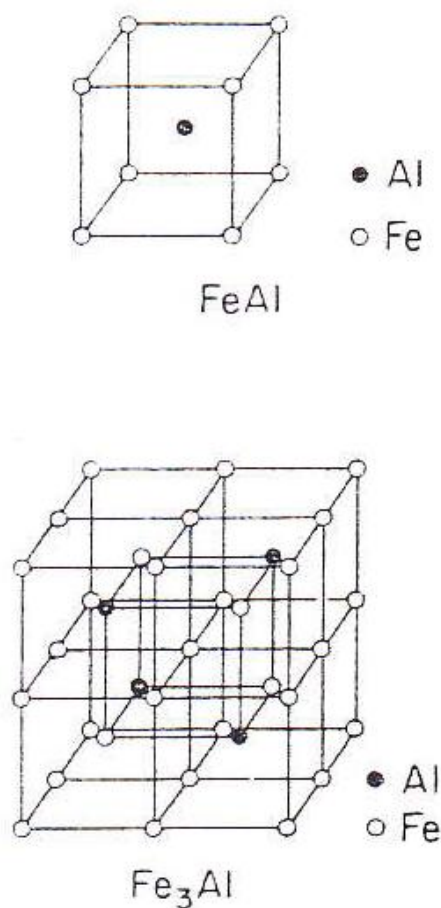


Obr. 2.11: Fázový diagram Fe – Al [8]

2.2.3 Mikrostruktury aluminidu železa [8]

Uspořádané buňky FeAl (B2) a Fe₃Al (D0₃) (obr. 2.12) vycházejí z krychlové prostorově středěné struktury. FeAl supermřížka může být popsána jako proniknutí dvou jednoduchých krychlových mřížek atomy železa v jedné a hliníkem v druhé.

Supermřížka Fe_3Al je složena z osmi FeAl supermřížek sloučených dohromady, ale se střídajícími se prostorově středěnými atomy železa a hliníku.

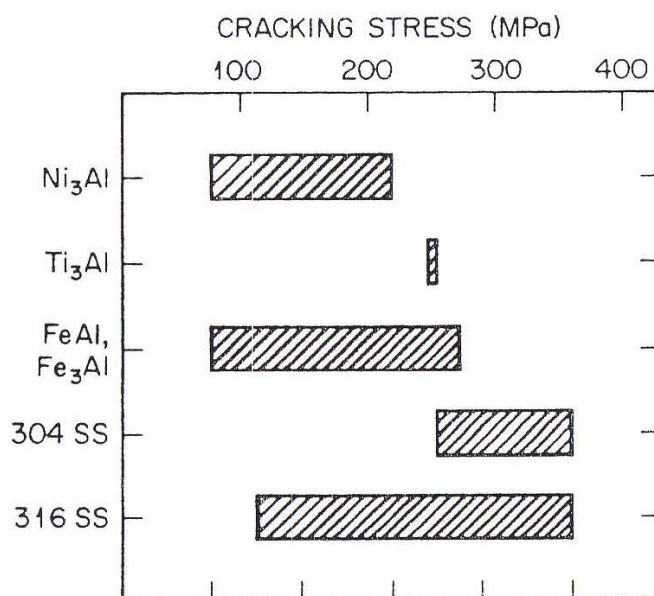


Obr. 2.12: Buňka FeAl a Fe_3Al [8]

2.2.4 Svařitelnost [8]

Svařování je hlavním prostorem pro využití potenciálu výhod unikátních vlastností, které nabízí aluminidy železa. Svařovací proces musí být schopný produkovat vysoce kvalitní svařované součásti bez defektů a také s mechanickými vlastnostmi porovnatelnými s klasickým kovem. Je prokázáno, že aluminidy železa mají sklon k trhlinám za studena a také ke vzniku trhlin za tepla při menší změně složení slitiny. Trhliny za studena hlavně vznikají kvůli citlivosti aluminidů železa na

vodík obsažený v prostředí. Pro mnoho složení aluminidů železa můžeme vzniku trhlín za studena, které se mohou projevit několik hodin nebo dní po svařování, zabránit použitím předehřevu o 200°C a po svařování výdrž na 400°C po jednu hodinu. Předehřev a výdrž na teplotě 400°C po svaření může snížit zbytkové napětí způsobené rozdílným tepelným pnutím a odvést zbytkový vodík. Citlivost slitiny na trhliny za tepla se zjišťuje Sigmajig testem. Tento test využívá předem vneseného osového napětí během vlastního svařování vzorku plechu 50x50 mm pro určení mezního napětí, při jehož překročení dochází k trhlínám za tepla v oblasti tavení. Vnesené napětí je navyšováno, dokud se neobjeví trhliny. A toto mezní napětí je potom použito pro porovnání s dalšími stejně tak testovanými materiály (*obr. 2.13*). Pro zlepšení svařitelnosti se používají prvky, jako jsou niob, chrom a také malé množství uhlíku, zatímco prvky jako zirkon, bór a borid titanu svařitelnost ovlivňují negativně.

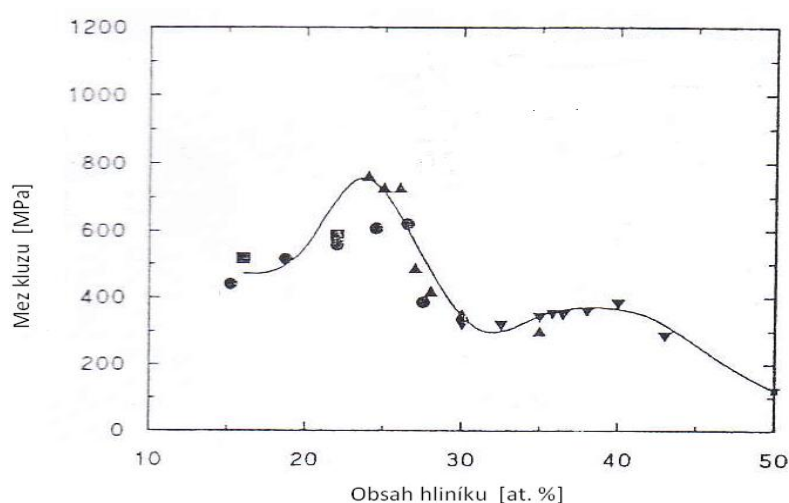


Obr. 2.13: Porovnání mezního napětí trhlín za tepla pro FeAl, Fe₃Al a další slitiny [8]

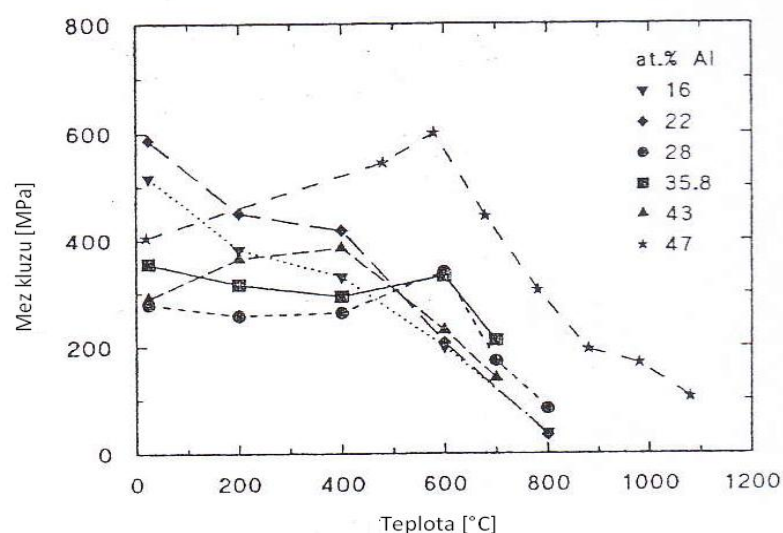
2.2.5 Mechanické vlastnosti [8]

Pevnost v tahu je velice citlivá na mnoho činitelů zahrnujících velikost obsahu hliníku, uspořádání, tepelném zpracování, teplotě, přísadách slitiny, prostředí, mikrostruktuře a kazech. Při pokojové teplotě má mez kluzu u binárních slitin

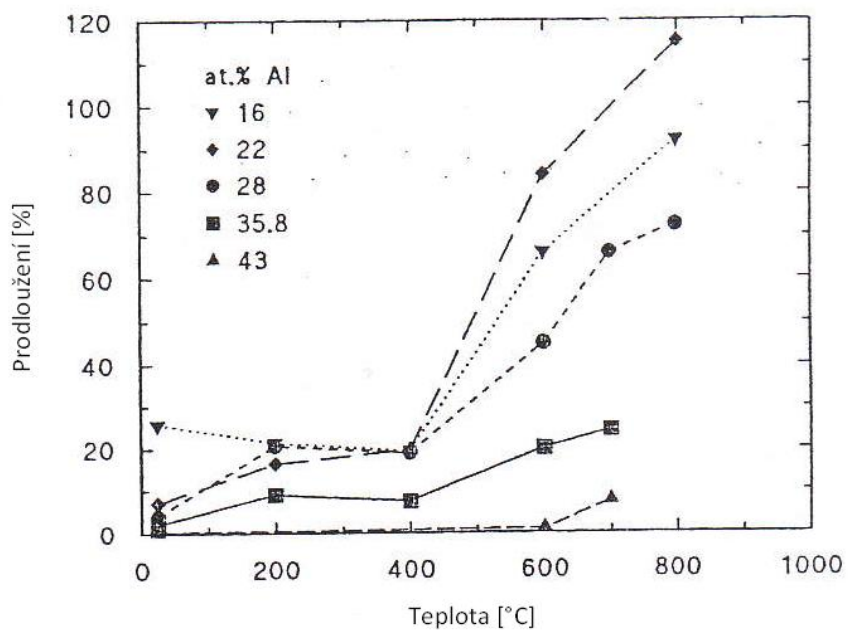
tendenci k růstu při navyšování hliníkové složky. Potom dosáhne vrcholu poblíž složení Fe_3Al a dále klesá (obr. 2.14). U binárních slitin je nejvyšší mez kluzu spojena s Fe_3Al stechiometrickým složením slitiny. Důvodem vyšší pevnosti je vyšší stupeň uspořádání D0_3 . Maximum meze pevnosti závislé na teplotě pro většinou používané binární slitiny s 28at.% hliníku leží blízko přechodové teploty $\text{D0}_3\text{-B2}$, která se pohybuje kolem 550°C (obr. 2.15). Tažnost může být zlepšena tepelným zpracováním. Při nárůstu teploty nad 600°C pevnost výrazně klesá, zatímco prodloužení narůstá (obr. 2.16), ale při narůstajícím obsahu hliníku prodloužení klesá (obr. 2.17).



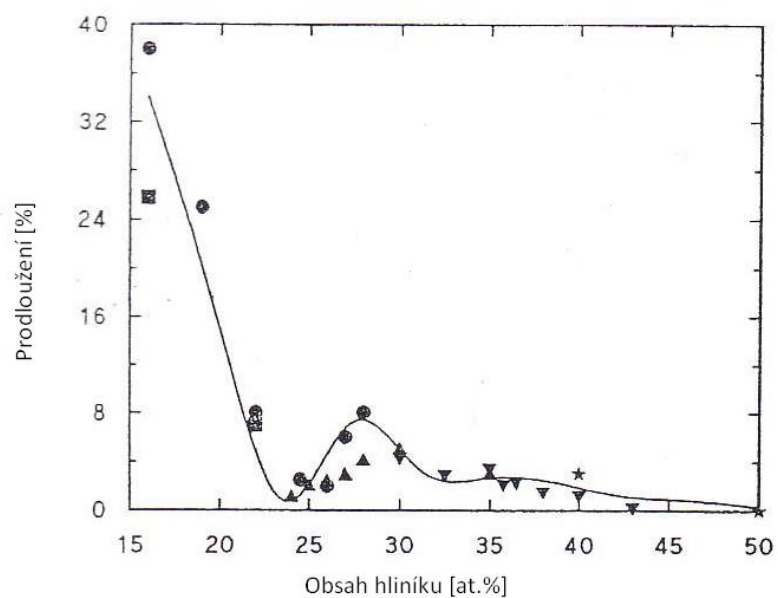
Obr. 2.14: Graf meze kluzu v závislosti na obsahu hliníku [8]



Obr. 2.15: Graf meze kluzu v závislosti na teplotě pro různé obsahy hliníku [8]



Obr. 2.16: Graf prodloužení v závislosti na teplotě pro různé obsahy hliníku [8]



Obr. 2.17: Graf prodloužení v závislosti na obsahu hliníku [8]

2.2.6 Příměsi [8], [9]

Mechanické, fyzikální, svařovací, antikorozi, výrobní vlastnosti aluminidů železa jsou velice citlivé na příměsi. Například mez tečení může být vylepšena přidáním příměsí, jako jsou Si, Ce, Ti, Mo, Zr, Hf, Nb, Ta. Niob nebo molybden v kombinaci s malým množstvím zirkonu výrazně zlepši skutečnou creepovou pevnost. Další příměsí jsou C, TiB₂, Cu.

➤ *Chró*m - Obsah chrómu je vhodný do 6at%. Pozitivně ovlivňuje tvoření oxidů. Výsledkem je zvýšení tažnosti za pokojové teploty. S rostoucím obsahem Cr se zvyšuje odolnost proti oxidaci a naopak slitina obsahující více než 2at.% chrómu je méně odolná proti siřičitému prostředí. Dobrou vlastností je zvýšení svařitelnosti materiálu. Jako jediný zlepšuje tažnost při pokojové teplotě. Při použití 2-6at.% chrómu se zvýší tažnost dvojnásobně, zatímco se mez kluzu zmenší.

➤ *Cér* - Jeho využití je ve zlepšení tažnosti a vysokoteplotní pevnosti.

➤ *Borid titanu* - Zlepšuje pevnost, tažnost, zhoršuje svařitelnost.

➤ *Bór* - Zlepšuje tažnost

➤ *Molybden* - Zvyšuje teplotu fázového přechodu B2 - D0₃. Dochází ke zjemnění zrna. Zlepšuje vysokoteplotní vlastnosti Fe₃Al, ale s jeho rostoucím obsahem klesá tažnost za pokojové teploty.

➤ *Měď* - Způsobuje zvýšení tvrdosti a meze kluzu, ale také zvýšení křehkosti.

➤ *Uhlík* - Zvyšuje tažnost a mez kluzu a také zlepšuje v malém množství svařitelnost.

➤ *Křemík* - Zvyšuje pevnost za vyšších teplot ale i také křehkost a jeho použití je proto zřídka.

➤ *Titan* - Zvyšuje pevnost za vyšších teplot

➤ *Niob* - Zlepšuje svařitelnost

2.2.7 Výroba slitin na bázi aluminidu železa [9]

Vznik Fe_3Al ze základních prvků železa a hliníku představuje exotermickou reakci. Konvenční způsob roztavení železa a přidání hliníku způsobuje vzrůst teploty taveniny o několik set stupňů [9]. Tím se prodlouží doba tavení a také se zvýší oxidace taveniny. Kvůli vysokému obsahu hliníku v těchto slitinách je vznik filmu Al_2O_3 velmi rychlý. Tento film brání jakémukoliv přechodu kyslíku nebo dusíku ze vzduchu do roztaveného kovu. Při lití ingotů je nutné dodržet přesné chemické složení, omezit vlivy při výrobě, protože jsou aluminidy železa velice citlivé na pohlcování vodíku při tavení a to by mohlo způsobit pórovitost. Jelikož má Fe_3Al nízkou tepelnou vodivost, jsou slitiny náchylné k praskání při rychlých změnách teploty během tuhnutí a ochlazování i při a po tepelném zpracování [9]. Pro tváření vyžadujeme materiál s malými rovnoosými zrny. Takováto zrna lze získat velkým přetvořením při vysokých teplotách s následujícím rekrytalizačním žíháním. Z tohoto důvodu se slitiny na bázi Fe_3Al většinou tváří za tepla válcováním, kováním a protlačováním při teplotách 600-1100°C. Takto lze získat tyče, dráty, plechy a trubky.

2.2.7.1 Tavení slitin na bázi Fe_3Al

- *AIM* – Air Induction Melting – Je to tavení v indukční peci na vzduchu, je to také nejnehospodárnější metoda, ale může být použita, pouze jestliže se ochranná struska vytvoří snadno na roztaveném kovu. Velké šarže vyrobené touto metodou (250 Kg) se vyznačují dobrou kvalitou povrchu, ale obsahují určitou pórovitost.
- *VIM* – Vacuum Induction Melting – Je to metoda tavení ve vakuu, která se doporučuje k zabránění pórovitosti a k řízení mikrostruktury.
- *VAR* – Vacuum Arc Remelting – Je to tavení ve vakuové obloukové peci, použití této metody je stejné jako u VIM.
- *VADER* – Vacuum Arc-Double Electrode Remelting – Metoda tavení v pecích s ochrannou atmosférou.
- *ESR* – Electroslag Remelting – Elektrostruskové přetavování.

2.2.8 Ověřovací zkoušky svařování aluminidu železa na KSP [10]

Na katedře strojírenské technologie bylo provedeno několik ověřovacích zkoušek svařitelnosti aluminidu železa.

Základním cílem experimentů byla snaha o nalezení technologických podmínek a parametrů svařovacího procesu pro vytvoření svarů bez výskytu trhlin také u rozměrnějších polotovarů [10]. Při řešení úkolu 2706/2200 na KSP byl použit pás plechu aluminidu železa, ze kterého se vyrobilo 6 vzorků pro svaření zkušebních svarů s chemickým složením 16,13 % Al, 2,85 % Cr, 0,06 % Ce, 0,46 % Mn a 0,04 % C hmotnostně. Tento materiál již sám o sobě obsahoval před svařováním velké množství vad necelistvosti. Zkoušky byly realizovány metodou WIG a jako svařovací zdroj byl použit MIGATRONIC 3000 AC/DC. Předehřev vzorků se prováděl plotynkou na které byla položena deska ze siluminu opatřená po bocích izolací. Teplota předehřevu byla kontrolována pomocí termočlánku, který byl umístěn ve vyvrtaném otvoru ve vzorku. Svarové plochy se před svařením opatrně obrousili, aby došlo k odstranění zoxidované vrstvy. Při tomto ověřování svařitelnosti aluminidu železa se sledovalo chování svarové lázně, formování svaru a stabilita hoření elektrického oblouku. Hlavním faktorem, kterým se hodnotila kvalita svaru, bylo určení, zda se ve svaru nebo teplem ovlivněném pásmu objevily trhliny. Proto se každý vzorek před svařením podrobil kapilární zkoušce. U vzorků byly rovněž zhotoveny metalografické výbrusy pro rozboru svarů a také byly vyhodnocovány průběhy teplot.

Výsledkem tohoto experimentu bylo zjištění, že všechny vzorky svařené při teplotě předehřevu 400°C s 2 hodinovým dohřevem na teplotě 720°C a chladnutím v peci neobsahovali trhliny. Také se ukázalo, že při svařování objemnějších vzorků se musí použít stehování pro zamezení vzniku nežádoucích deformací, tedy je nutno vzorky pevně upnout. A protože nebylo k dispozici dostatečně velké množství materiálu, bylo doporučeno, aby se do budoucna uvažovalo o využití simulačního programu SYSWELD pro předběžné porovnání charakteru zbytkových napětí ve svarku i jeho deformací [10].

2.3 Monitorování a dokumentace procesu svařování pomocí WeldMonitoru 3.5 [11]

WeldMonitor umožňuje díky použití moderní digitální techniky monitorovat a podrobně dokumentovat proces obloukového svařování a tím zajistit snadnější reprodukovatelnost svarových spojů v co nejvyšší kvalitě. Zaznamenává, zobrazuje a analyzuje svařovací parametry a tím pomáhá odhalovat chyby svarů. Pomáhá odhalit nedodržení zvoleného postupu svařování díky zobrazení odchylky od tzv. vzorového svaru. Také zvyšuje kvalitu výroby svarových spojů a zároveň snižuje výrobní náklady. Je to ideální nástroj pro vytváření dokumentace svařování, usnadňuje navrhování postupů svařování (WI, WPS) [11].

2.3.1 WeldMonitor hardware

WeldMonitor (*obr. 2.18*) se připojuje se na libovolný svařovací stroj a potom také k řídicímu počítači. V základním provedení monitoruje průběh svařovacího proudu a napětí. S vysokou přesností měří online efektivní hodnoty těchto veličin a zároveň kalkuluje vnesené teplo. Umožňuje velmi rychlý záznam průběhu svařovacího napětí a proudu, kdy jsou zaznamenávány změny v napětí a proudu až do frekvenčního rozsahu 12500 Hz, což je nezbytná podmínka pro spolehlivou diagnostiku zkratových, impulsních a sprchových svařovacích procesů. Také lze provádět monitorování svařovacích parametrů z více svařovacích strojů najednou. Má metrologické parametry ověřeny v akreditované zkušebně ČR [11].

2.3.1.1 Snímače

- *Modul pro snímání proudu a napětí*
- *Modul pro manuální ovládání programu*
- *Snímač relativní vlhkosti vzduchu v okolí*
- *Snímač teploty vzduchu v okolí*
- *Snímač teploty materiálu*
- *Snímač rychlosti pojezdu*
- *Snímač průtoku plynu*

2.3.1.2 Sledované veličiny

- Čas svařování
- Rychlost svařování
- Měrný tepelný výkon
- Spotřeba drátu
- Spotřeba ochranných plynů
- Spotřeba energie



Obr. 2.18: WeldMonitor hardware [11]

2.3.2 WeldMonitor software

Zajišťuje spolehlivý záznam měřených průběhů. Umožňuje vysoce sofistikované zobrazování reálných nasnímaných dat. Obsahuje diagnostiku v reálném čase. Zahrnuje evidenci, dokumentaci a databázovou správu [11]. Dále program obsahuje monitorování procesu svařování, zobrazení a záznam údajů v reálném čase na displeji počítače, analýzu parametrů svařování, tisk parametrů a grafů. Dokumentace svaru se v programu weldmonitor skládá z postupu svařování (pWPS, WI), protokolu Vizuální kontroly, protokolu WPS a odhadu nákladů svařování.

2.4 Vady a jakosti tupých svarů dle ČSN EN ISO 5817 [4], [12]

Tato mezinárodní norma určuje stupně jakosti podle vad svarových spojů zhotovených tavným svařováním, mimo elektronového a laserového svařování pro všechny druhy ocelí, niklu, titanu a jejich slitin. Platí pro tloušťky materiálu větších než 0,5 mm [12]. Dále platí pro ruční, mechanizované a automatizované svařování a také pro všechny polohy svařování, samozřejmě i pro všechny druhy svarů. Norma uvádí tři stupně jakosti, označené B, C a D, aby bylo možné použití pro širokou řadu svařovaných výrobků [12]. Nejvyšším požadavkům na jakost zhotovenému svaru odpovídá stupeň B. Tato norma nezahrnuje metalurgická hlediska, jako jsou velikost zrna a tvrdost. U svarového spoje musí být obvykle odděleně hodnocen každý jednotlivý druh vady. Různé druhy vad vyskytující se v libovolném průřezu spoje, které zeslabují plochu průřezu, mohou vyžadovat zvláštní pozornost. Mezní hodnoty vad pro vícenásobné vady jsou použitelné pouze v případech, kde nejsou překročeny požadavky na jednotlivou vadu. Jakékoliv dvě sousedící vady oddělené od sebe na vzdálenost, která je menší než hlavní rozměr menší vady, musí být posuzovány jako jednotlivá vada [12]. V *tab. 2.2* jsou uvedeny vady, které se mohou vyskytnout při svařování metodou WIG.

Tab. 2.2: Možné vady svarů při svařování metodou WIG [4]

Název vady	Příčina
Póry a bubliny ve svaru, oxidické vměstky	Nečistý ochranný plyn, znečištěný materiál, nedostatečná plynová ochrana, nesprávný postup svařování
Vměstky ve svarovém kovu	Nalegování elektrody od přídavného materiálu
Neprůvary v kořenu svaru	Velká rychlost svařování, malá intenzita proudu, nevyhovující příprava svařovacích ploch
Vruby ve svarovém spoji	Velké množství argonu, velká intenzita proudu, přehřátý materiál
Studený spoj	Velká rychlost svařování, velký průměr přídavného materiálu, nízký proud, nevhodná příprava ploch
Nečistý povrch svaru	Nečistý ochranný plyn, nalegovaná elektroda, nedostatečná ochrana, nečistoty na povrchu materiálu, nestabilní oblouk
Protečený kořen svaru (krápník)	Velký svařovací proud, pomalá rychlost svařování, velká mezera mezi svařovanými materiály
Vydutý kořen svaru	Velký průtok formovacího plynu
Vyosení svaru	Předchozí vrstva nesprávně uložena, ztráta orientace
Nadměrné převýšení svaru	Malá rychlost svařování, velký průměr přídavného materiálu, nízký svařovací proud

3 Experimentální část

3.1 Zaměření a cíl práce

Cílem této práce bylo zhodnotit vliv vybraných technologických parametrů svařování na tvar svarové lázně, strukturu a vlastnosti svarů aluminidu železa. Tyto poznatky by měly být využity k zpřesnění simulací v programu SYSWELD. Každý svařovaný vzorek byl svařen různými svařovacími parametry, tyto parametry byly předem odzkoušeny na zkušebních vzorcích. Toto odzkoušení parametrů je součástí diplomové práce diplomanta J. Tauchmana. Z počátku se také uvažovalo o použití prostředku PATIG, ale po svaření několika zkušebních vzorků se od použití upustilo. U každého vzorku byl zaznamenáván průběh teplot termočlánky, u všech kromě vzorku č. 4 se prováděly metalografické výbrusy. Ty se prováděli především v místech termočlánků. Průběh svařování byl sledován a zaznamenáván programem WeldMonitor 3.5. U svařených vzorků se také zjišťovalo vnesené teplo rovnicí (3.1) a pro zaznamenané průběhy teplot kritická doba chladnutí $\Delta t_{8,5}$.

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s \cdot 1000} \quad (3.1)$$

kde je:

Q ... vnesené teplo [kJ/mm]

η ... účinnost oblouku - dle ČSN EN 1011-1 [13] u metody 141 $\eta = 0,6$ [1]

U ... napětí oblouku [V]

I ... proud oblouku [A]

v_s ... rychlost svařování [mm/s]

3.2 Laboratoř svařování

Pro náš experiment bylo využito lineární dráhy s upínací deskou se zabudovaným transformátorem a frekvenčním měničem, tato část byla řešena samostatně v rámci další diplomové práce diplomanta J. Tauchmana (*obr. 3.1 a obr. 3.2*), svařovacího zdroje Migatron Navigator 3000 a zařízení pro monitorizaci svařovacího procesu včetně programu WeldMonitor 3.5. Pro dohřev byla použita pec

(obr. 3.3) a pro zhotovení výbrusů a jejich zhodnocení byla k dispozici metalografická laboratoř.



Obr. 3.1: Svařovací pracoviště




Obr. 3.2: Svařovací pracoviště



Obr. 3.3: Pec

3.2.1 Svařovací zdroj Migatron Navigator 3000 AC/DC

Je to třífázové invertorové zařízení speciálně vyvinuté pro svařování metodou WIG s maximálním svařovacím proudem 250 A resp. 300A, především pro svařování hliníku a jeho slitin. Digitální řízení umožňuje velmi rychlou odezvu na veškeré změny při procesu svařování. Zdroj obsahuje širokou škálu svařovacích programů pro různé typy svařovaných materiálů, ochranných plynů a přídavných materiálů (obr. 3.4).

Typ	Navigator 3000 AC/DC	
Napájecí napětí	3x400 V±15%	
Rozsah proudu	5 – 300 A	
Zatěžovatel 100%	190 A/27,6 V	
Zatěžovatel 60%	240 A/29,6 V	
Zatěžovatel 40%	300 A/32 V	
Napětí naprázdno	80 V	
Krytí	IP 23	
Rozměry	563x300x698	
Hmotnost	34 kg	

Obr. 3.4: Svařovací zdroj Migatron Navigator 3000 AC/DC

3.2.2 Metalografická laboratoř

Metalografická laboratoř (*obr. 3.5*) je vybavena optickým mikroskopem NEOPHOT 21, digitální kamerou Nikon, která je napojena na počítač, který je vybaven programem NIS Elements2.3 CZ. Tento program dokáže vyhodnocovat geometrii svaru.



Obr. 3.5: Metalografická laboratoř

3.2.3 Ochranný plyn

Jako ochranný plyn byl použit Argon 4,8 (čistota 99,998 %), který je chemicky inertní, a proto se používá ke svařování reaktivních kovů. Má nízkou tepelnou vodivost a vlastnosti zaručující malý přechod tepla z oblouku do okolních zón. Díky tomu vzniká úzký sloupec oblouku, který vytváří hluboký a relativně úzký závar. Jeho použití, i když jen v nepatrné míře, zapříčiňuje zápaly nebo špatné kresby svaru kvůli nedostatku tepla na okraji svarové lázně.

3.2.4 Tavidlo OK FLUX 10.47

Je to bazické tavidlo pro vícevrstvé svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí s požadavky na dobrou vrubovou houževnatost svarového kovu až do - 40°C. Tavidlo má dobrou odstranitelnost strusky.

3.2.5 Svařovaný materiál

Svařovaný materiál byl na bázi Fe_3Al . Přesná specifikace nebyla provedena, ale tento materiál by měl odpovídat Fe_3Al s 28at.%. Dále byl legován chrómem a cérem.

3.3. Svařování vzorků

Mechanizované WIG svařování tupých svarů aluminidu železa v poloze PA podle ISO 6947 na jednu housenku bez přídavného materiálu s hořákem upnutým na lineární dráze. Všechny vzorky byly svařovány stejnosměrným proudem. Použité svařovací parametry byly předem zjištěny svařením zkušebních vzorků, toto odzkoušení parametrů je zahrnuto v diplomové práci diplomanta J. Tauchmana. Pojezd byl poháněn elektromotorem, který byl řízen frekvenčním měničem. Ke zjištění rychlosti z Hz na mm/s je uvedena *tab. 3.1*. Vzorky byly očištěny od zoxidované vrstvy v místě svaru opatrným broušením. Dále byly vzorky opatřeny termočládky (NiCr - Ni) a před samotným svařením předeřhřáty na nerezové desce na teplotu 200 respektive 400°C s následným dohřevem v peci na 700°C ihned po jejich svaření. Nerezová deska má v místě kořene svaru vyfrézovanou drážku o šířce 8 mm, ve které bylo umístěno tavidlo pro ochranu kořene svaru.

Tab. 3.1: Převodová tabulka

Frekvence [Hz]	Otáčky [1/min]	Rychlost v_s [mm/s]
10	3	0,15
15	4,5	0,225
20	6	0,3
25	7,5	0,375
30	9	0,47
35	10,5	0,525
40	12	0,6
45	13,5	0,675
50	15	0,75
60	18	0,9
100	30	1,5

Pozn. Stoupání závitu je 3mm/otáčku

3.3.1 Svar č. 1

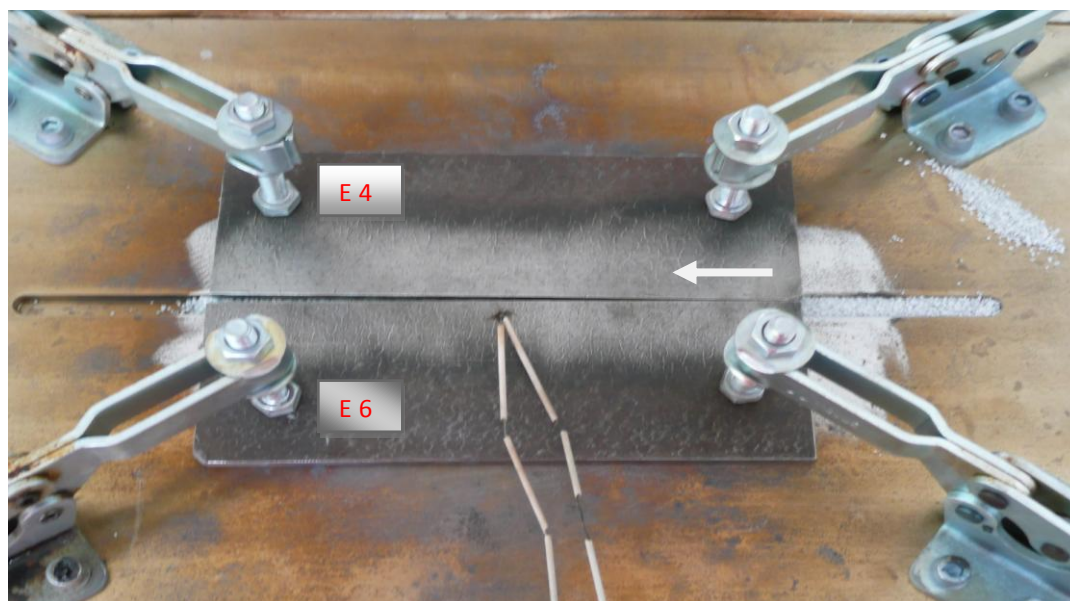
Svar č. 1 se skládá ze vzorků s označením E4 a E6. Tyto vzorky byly upnuty na vyhřívané nerezové desce (obr. 3.6). Vzorek E6 byl upnut na pevně, zatímco vzorek E4 byl upnut pevně pouze na jednom místě, aby mohlo dojít ke stažení obou vzorků při svařování. Tab. 3.2 uvádí rozměry svařovaných vzorků, označení v programu WeldMonitor 3.5 a tab. 3.3 počáteční parametry svařování. Průměr elektrody WT 20 pro svařování byl zvolen 3,2 mm a bylo také použito hubice se sítkem pro lepší ochranu svarové lázně. Ochranným plynem byl Argon 4,8. Vzorek E6 byl opatřen termočlánkem pro zaznamenání průběhu teploty vzdáleným od pravé hrany 90 mm a od horní hrany 6 mm. Rozevření obou vzorků na konci činilo 4 mm.

Tab. 3.2: Označení a rozměry vzorků

Označení vzorku	Rozměry [mm]	Číslo svaru ve WeldMonitoru 3.5
E4	180x60x4,5	80
E6	180x60x4,5	

Tab. 3.3: Počáteční parametry svařování

Rychlost svařování [mm/s]	DC - I [A]	Průtok plynu [l/min]	Teplota předehřevu [°C]
0,6	90	12	400

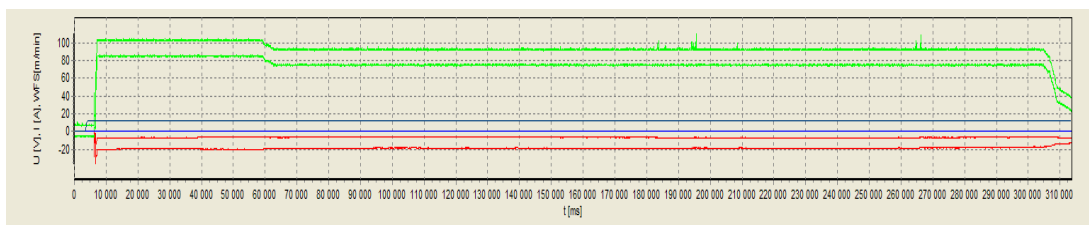


Pozn. Šipka znázorňuje směr svařování.

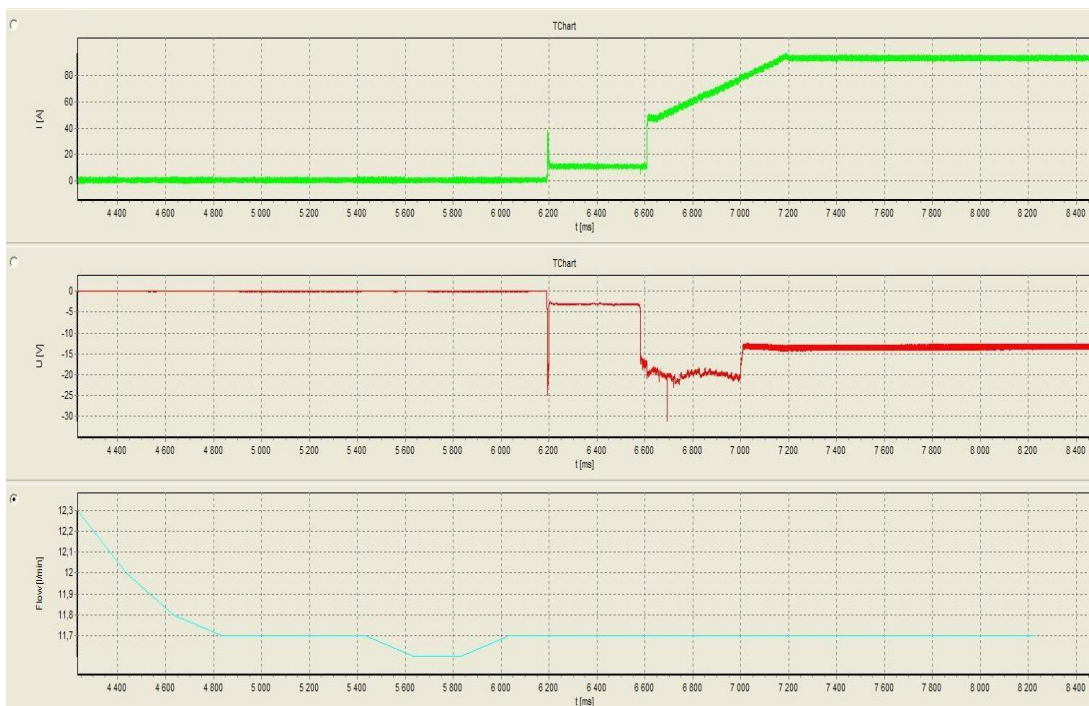
Obr. 3.6: Upnuté vzorky E4 + E6 s přivařeným termočlánkem

3.3.1.1 Průběh svařování

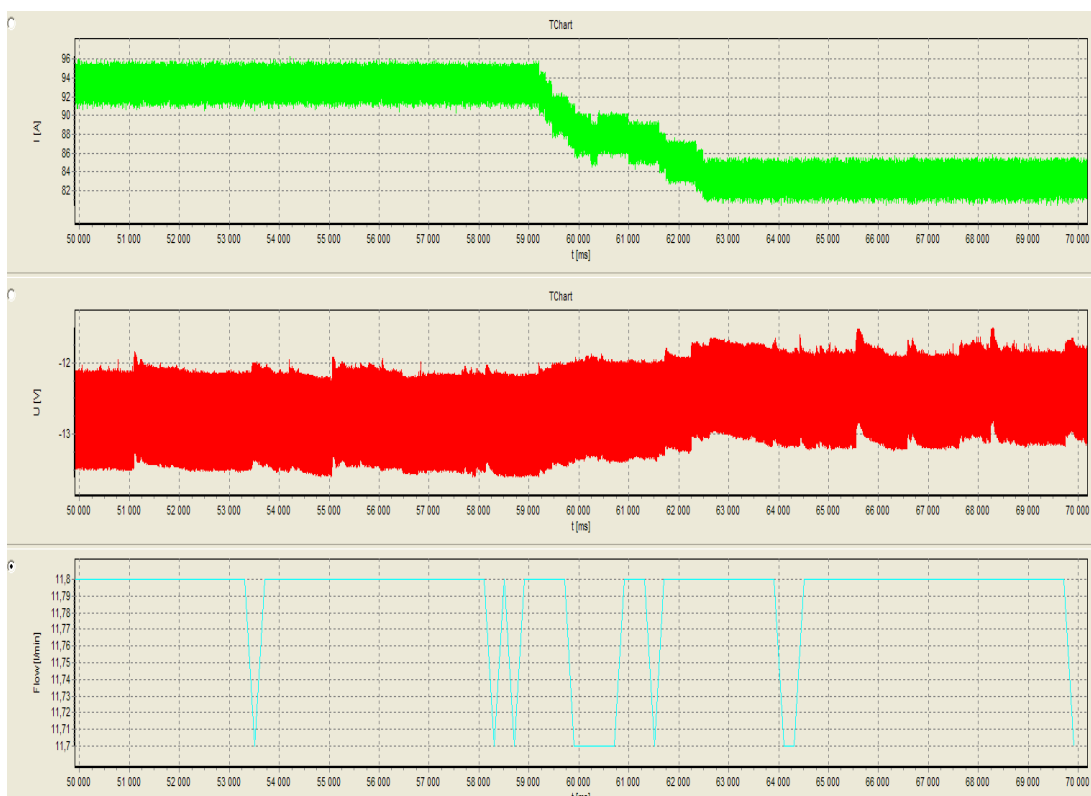
Zapnutí snímacích zařízení odpovídá čas $t = 0$ s. Začátek svařování byl po 7 sekundách (*obr. 3.8*), rozjezd dráhy nastal v čase $t = 15,9$ s. Po necelých 60 sekundách měření následovalo snížení proudu z 90 A na 80 A (*obr. 3.9*) z důvodu propadání svarové lázně. Ke konci svařování v čase $t = 305$ s následovalo další snížení proudu tentokrát na 40 A (*obr. 3.10*) kvůli zamezení vzniku kráteru na konci svaru. K ukončení měření došlo v čase $t = 313$ s. Celkový průběh svařování je na *obr. 3.7*. Ihned po dokončení svařování se svařený vzorek vložil do pece vyhřáté na 700°C a zde se ponechal 4 hodiny na výdrži při této teplotě s následným ochlazováním až do jeho úplného vychladnutí za 21 hodin. Během svařování také došlo k poškození termočlánku z důvodu jeho blízkosti vůči svarové lázni. Celková doba svařování byla 306s.



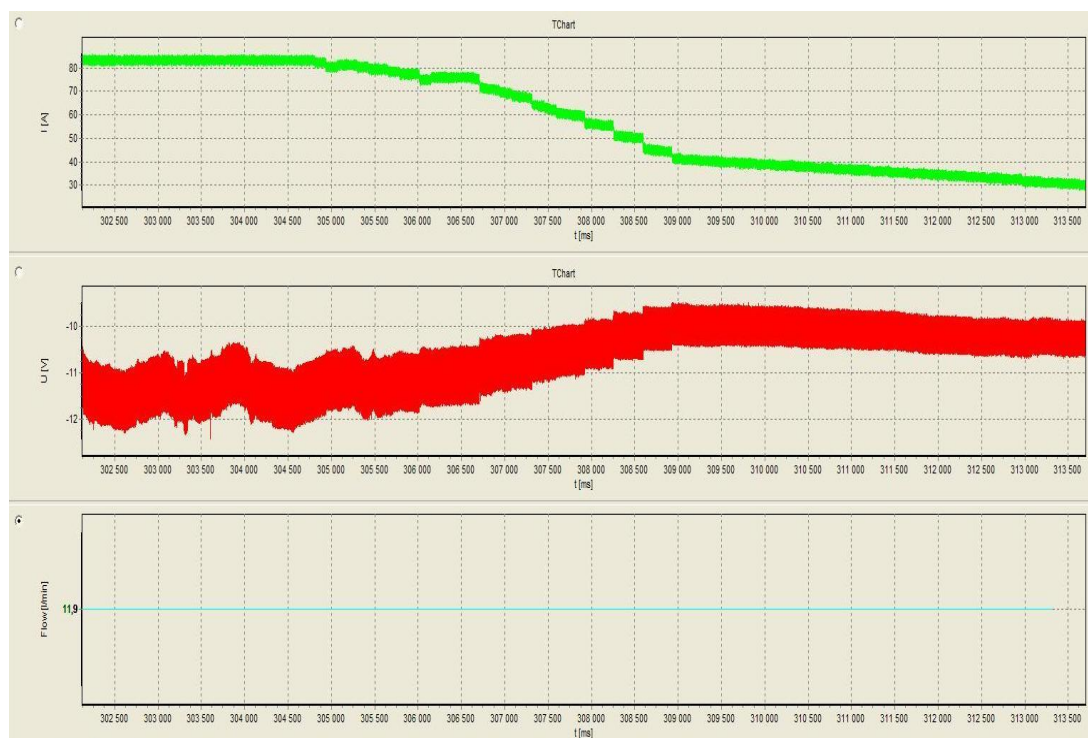
Obr. 3.7: Celkový průběh svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.8: Detail startu svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.9: Detail snížení proudu na 80 A v průběhu svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.10: Detail snížení proudu a ukončování svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5

3.3.1.2 Zhodnocení svařeného vzorku

➤ *Určení vneseného tepla* – Řídilo se výše uvedenou rovnicí (3.1), hodnoty vneseného tepla pro použité parametry jsou uvedeny v *tab. 3.4*.

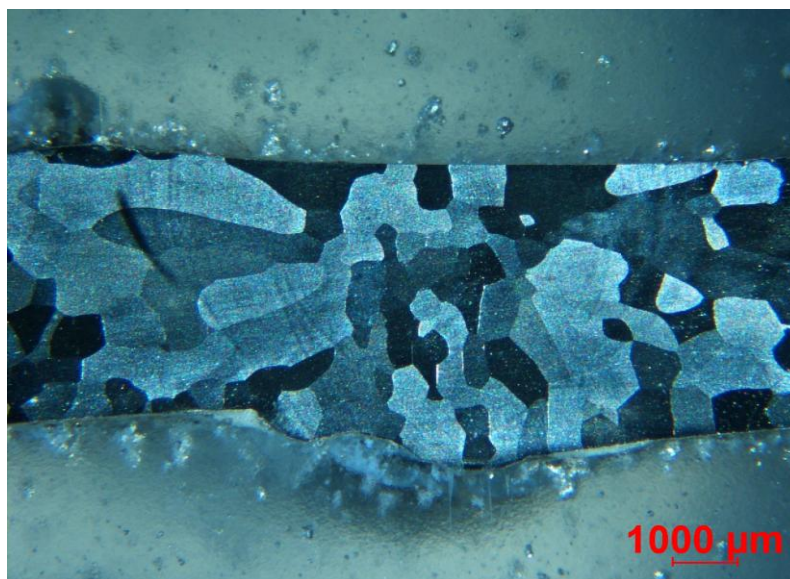
Tab. 3.4: Hodnoty vneseného tepla

	Start		Změna 1		Změna 2	
$v_s = 0,6$ [mm/s]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]
$\eta = 0,6$	90	13,3	80	12,7	40	10,2
Q [kJ/mm]	1,197		1,016		0,408	

➤ *Výbrus svařeného vzorku* – Na *obr. 3.11* je šipkou znázorněno umístění termočlánku a čárkovanou čarou je znázorněno místo řezu pro metalografický výbrus (*obr. 3.12*). Na svařeném vzorku (*obr. 3.11*) je také vidět, že svarová lázeň byla relativně úzká, což bylo dáno vyšší rychlosti svařování.



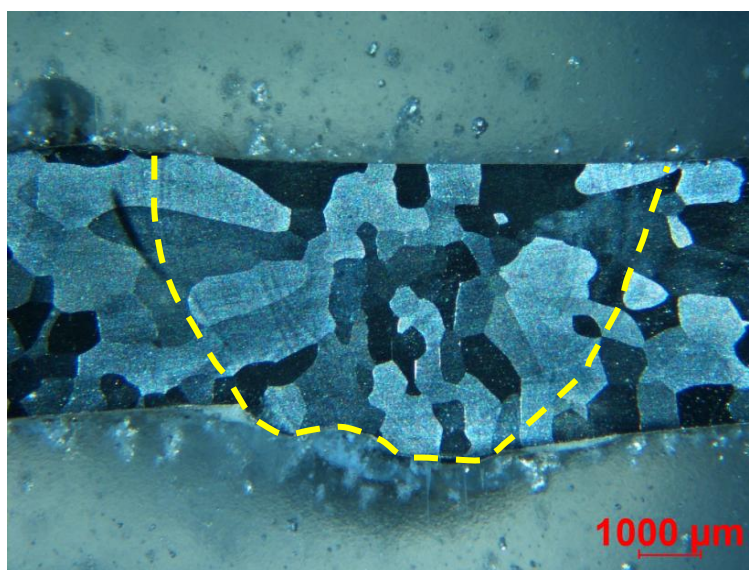
Obr. 3.11: Svařený vzorek E4 + E6 (80)



Obr. 3.12: Makrostruktura svaru - výbrus č. 1/80

Na obrázku makrostruktury výbrusu č. 1/80 (obr. 3.12) je vidět, že jsme dosáhli určitého provaření vzorku, ale jinak jsme ve zbytku svařeného vzorku č. 80 provaření téměř nedosáhli. Je zde vidět nestejnoseměrnost v provaření kořene, rovněž je svar bez převýšení. Ve středu svaru je struktura zrn jemnější oproti zbytku svaru. Ve svaru nejsou žádné další viditelné vady.

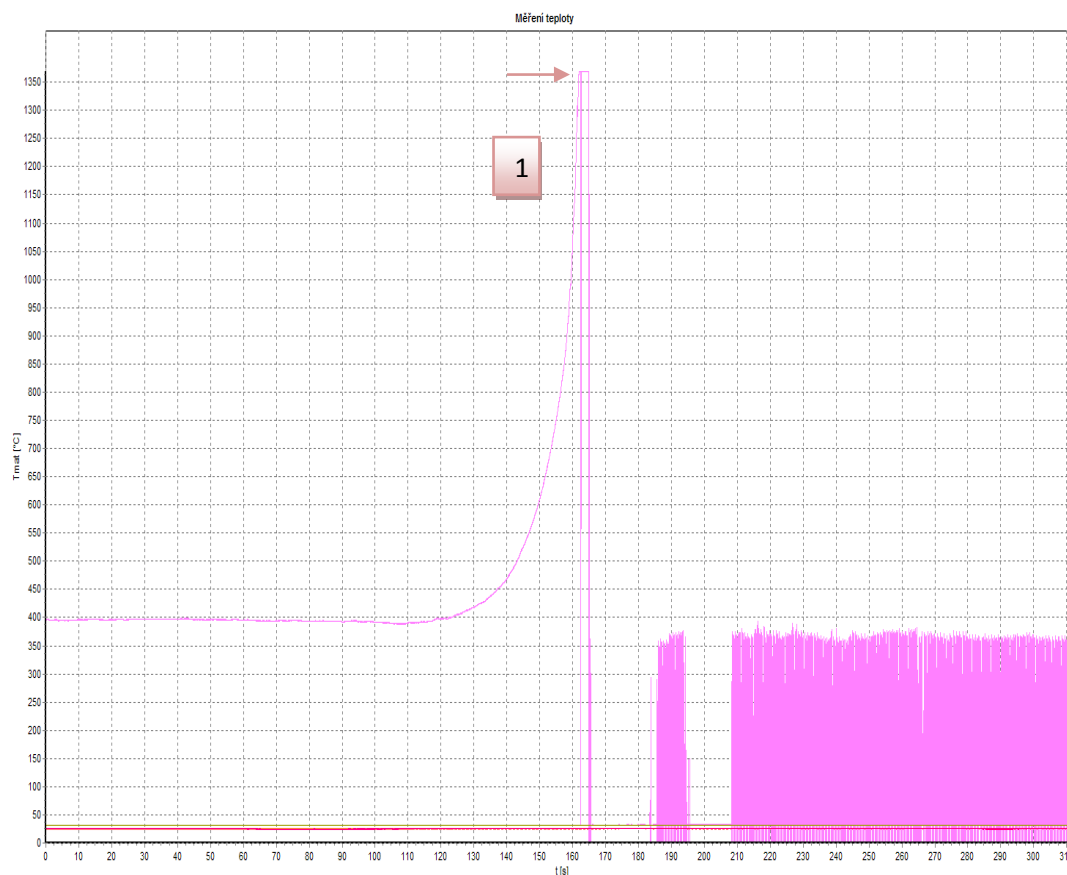
➤ *Určení tvaru svarové lázně* – Na obr. 3.13 je žlutou čarou znázorněna svarová lázeň.



Obr. 3.13: Makrostruktura s vyznačenou svarovou lázní - výbrus č. 1/80

U toho výbrusu bylo vyznačení svarové lázně velice obtížné, protože zde není vidět změna struktury. Toto může být zapříčiněno dohřevem 700°C po svařování, kdy zřejmě došlo žhání materiálu a tím i ke změně struktury.

➤ *Teplotní průběh* - Na obr. 3.14 je znázorněn průběh teploty v místě termočlánku. Bohužel došlo k jeho poškození, šipkou je znázorněna teplota, při které se tak stalo. Tato teplota je 1370°C.



Obr. 3.14: Průběh teploty na termočlánku

3.3.2 Svar č. 2

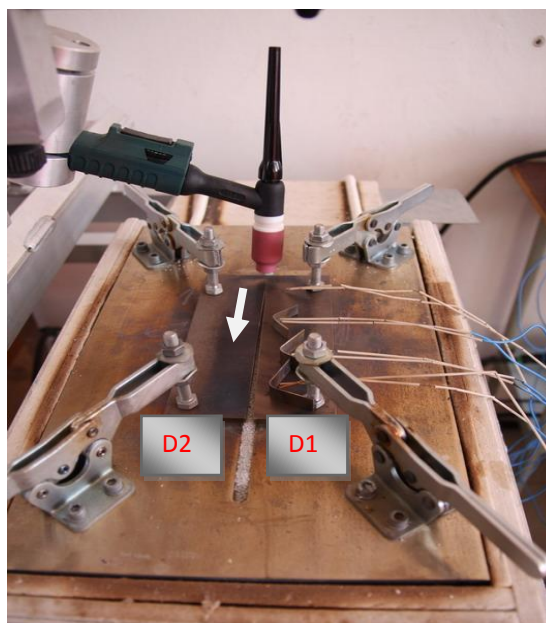
Svar č. 2 se skládá ze vzorků s označením D1 a D2. Tyto vzorky byly upnuty na vyhřívané nerezové desce (obr. 3.15). Vzorek D1 byl upnut na pevně, zatímco vzorek D2 byl pevně upnut v jednom místě, aby mohlo dojít ke stažení obou vzorků při svařování. Tab. 3.5 uvádí rozměry svařovaných vzorků, označení v programu WeldMonitor 3.5 a tab. 3.6 počáteční parametry svařování. Průměr elektrody WT 20 pro svařování byl zvolen 3,2 mm a bylo také použito hubice se sítkem pro lepší ochranu svarové lázně. Ochranným plynem byl Argon 4,8. Vzorek D1 byl opatřen čtyřmi termočládky pro zaznamenání teploty. Termočládky byly umístěny od horní hrany v následujících vzdálenostech: č. 1 a č. 2 17 mm a č. 3 a č. 4 10 mm. Rozevření obou vzorků na konci činilo 5 mm.

Tab. 3.5: Označení a rozměry vzorků

Označení vzorku	Rozměry [mm]	Číslo svaru ve WeldMonitoru 3.5
D1	180x50x5	82
D2	180x50x5	

Tab. 3.6: Počáteční parametry svařování

Rychlost svařování [mm/s]	DC - I [A]	Průtok plynu [l/min]	Teplota přehřevu [°C]
0,375	90	11	200

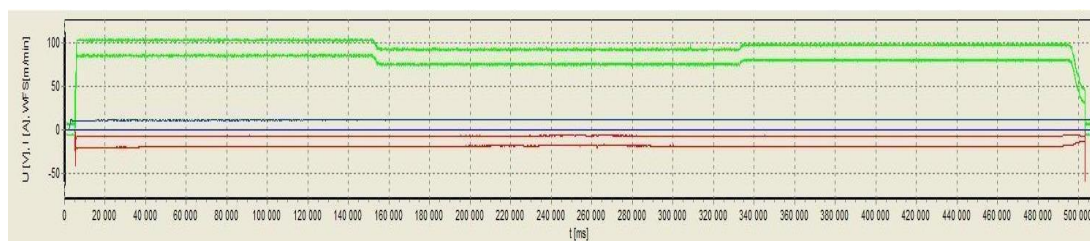


Pozn. Šipka znázorňuje směr svařování a značení termočládků je shora 1,3,2,4

Obr. 3.15: Upnuté vzorky D1 + D2 s přivařenými termočládky

3.3.2.1 Průběh svařování

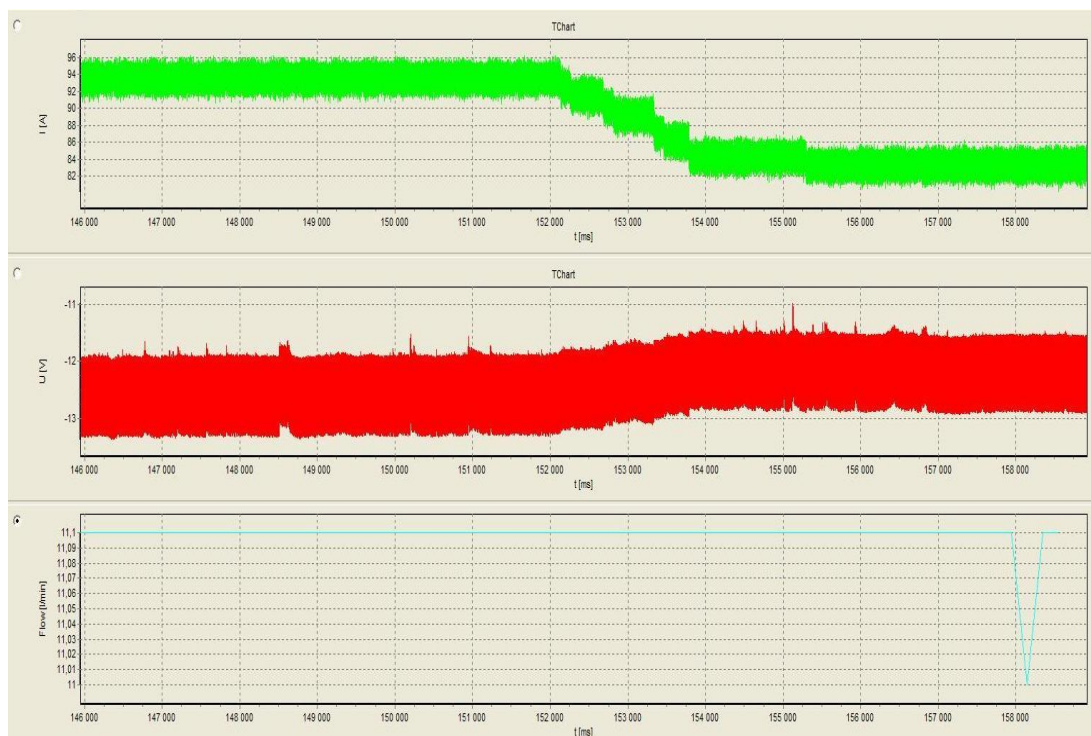
Zapnutí snímacích zařízení odpovídá čas $t = 0$ s. Začátek svařování byl po necelých 6 sekundách (*obr. 3.17*), rozjezd dráhy nastal v čase $t = 23,9$ s. Po 152 sekundách od začátku měření následovalo snížení proudu z 90 A na 80 A (*obr. 3.18*) opět z důvodu šířky a propadání svarové lázně. V čase měření $t = 331$ s následovalo zvýšení proudu na 85 A (*obr. 3.19*), protože se zdálo, že nedochází k provaření. Ke konci svařování v čase $t = 495$ s došlo ke snížení proudu na 40 A kvůli zamezení vzniku kráteru a následovalo ukončení svařování v čase $t = 503$ s (*obr. 3.20*). Celkový průběh svařování je na *obr. 3.16*. Ihned po dokončení svařování se svařený vzorek vložil do pece vyhřáté na 700°C a zde se ponechal 4 hodiny na výdrži při této teplotě s následným ochlazováním až do jeho úplného vychladnutí za 21 hodin. Celková doba svařování byla 498s.



Obr. 3.16: Celkový průběh svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



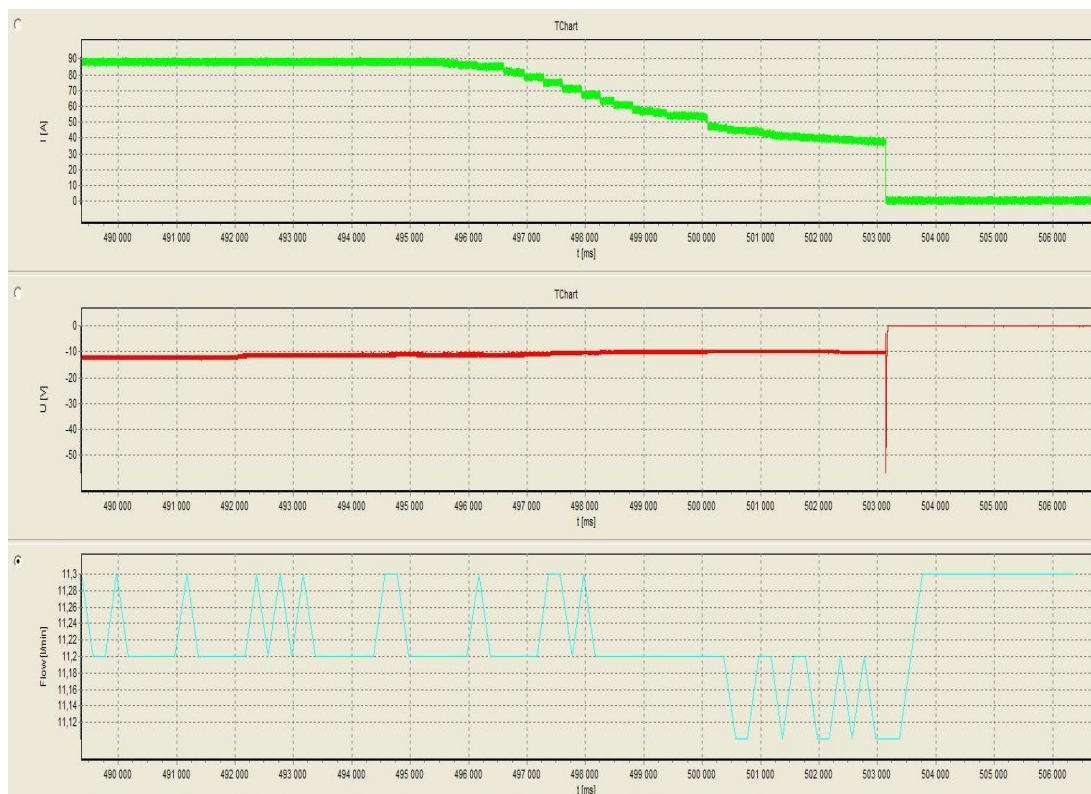
Obr. 3.17: Detail startu svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.18: Detail snížení proudu na 80 A zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.19: Detail zvýšení proudu na 85 A zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.20: Detail snížení proudu a ukončení svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5

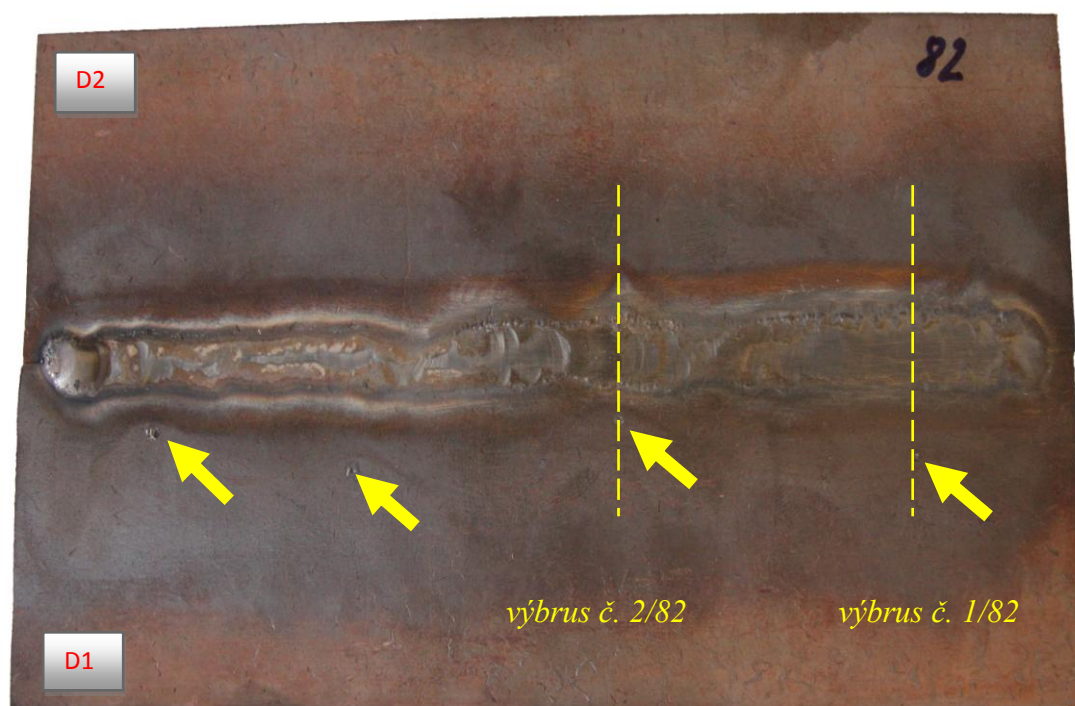
3.3.2.2 Zhodnocení svařeného vzorku

➤ *Určení vneseného tepla* – Řídilo se výše uvedenou rovnicí (3.1), hodnoty vneseného tepla pro použité parametry jsou uvedeny v tab. 3.7.

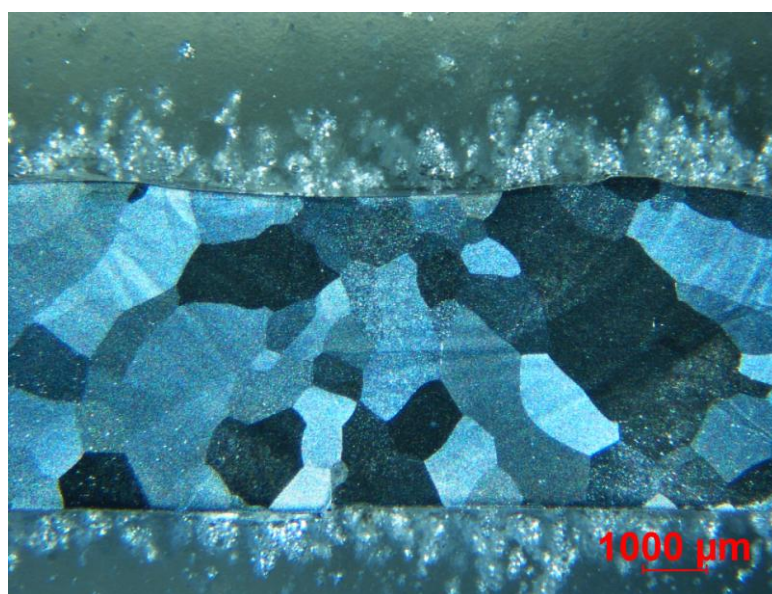
Tab. 3.7: Hodnoty vneseného tepla

	Start		Změna 1		Změna 2		Změna 3	
$v_s = 0,375$ [mm/s]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]
$\eta = 0,6$	90	13,1	80	12,7	85	12,9	40	10,1
Q [kJ/mm]	1,886		1,626		1,754		0,646	

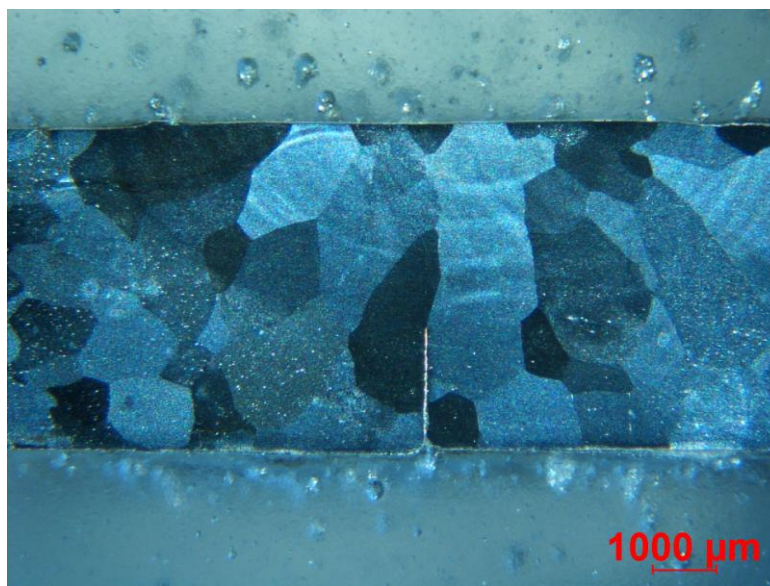
➤ *Výbrusy svařeného vzorku* - Na obr. 3.21 jsou šipkami znázorněna umístění termočlánků a čárkovanými čarami jsou znázorněna místa řezů pro metalografické výbrusy (obr. 3.22 a obr. 3.23).



Obr. 3.21: Svařené vzorky D1 + D2 (82)



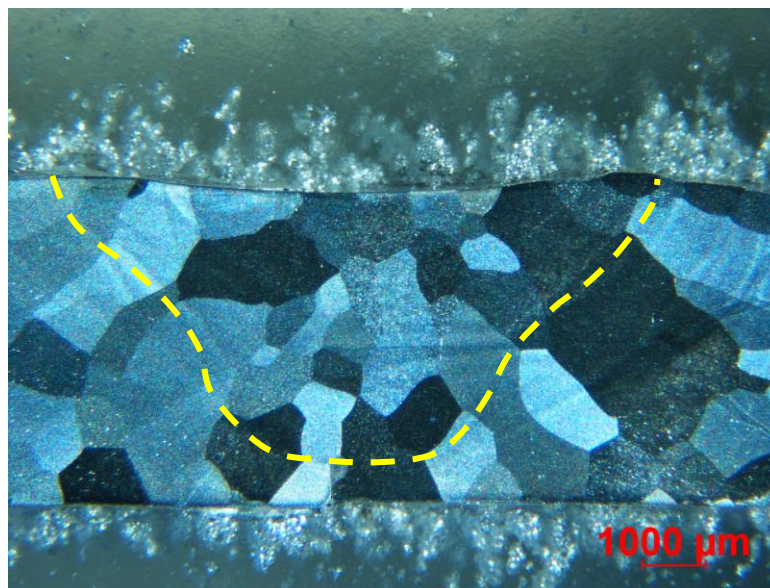
Obr. 3.22: Makrostruktura svaru - výbrus č. 1/82



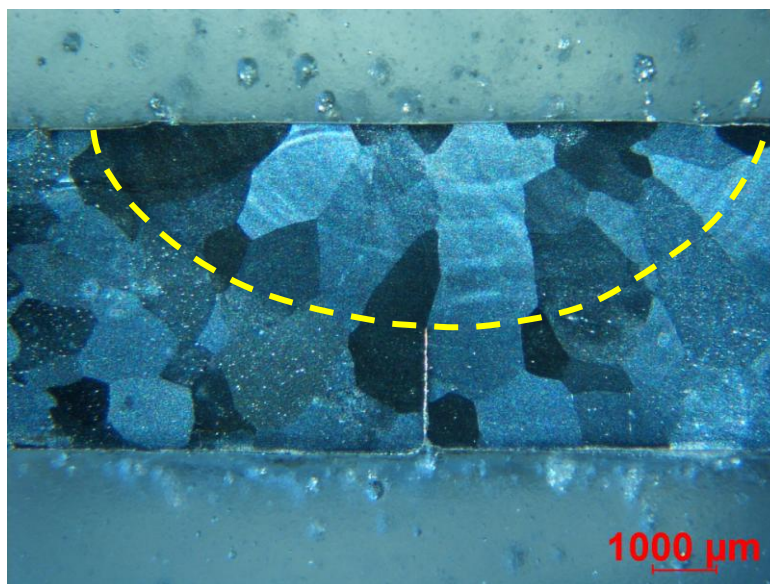
Obr. 3.23: Makrostruktura svaru - výbrus č. 2/82

Na obrázcích makrostruktur č. 1/82 a 2/82 je vidět, že ani v jednom případě nedošlo k provaření. Na *obr. 3.22* je vidět, že k provaření téměř došlo, ale je zde také vidět proláklý povrch svaru, kvůli kterému se při svařování snižoval proud z 90 A na 80 A a to vedlo právě k ještě většímu neprovaření u výbrusu č. 2/82, zde je právě velmi zřetelně vidět hrana (*obr. 3.23*). Co se týče jemnosti zrn u výbrusu č. 1/82 je vidět, že jemnější zrna jsou v dolní a horní části svaru. Svar výbrusu č. 2/82 je bez převýšení a jsou zde dobře viditelná hrubší zrna v celé ploše svaru. Ani u jednoho ze vzorků nejsou žádné další viditelné vady ve svaru.

➤ *Určení tvaru svarové lázně* – Na obr. 3.24 a obr. 3.25 jsou žlutými čarami znázorněny hranice ztavení. U výbrusu č. 1/82 je znázorněná hranice diskutabilní, protože opět zde není vidět jasná změna struktury. Na výbrusu č. 2/82 je hranice ztavení lépe určitelná oproti výše uvedenému výbrusu, protože jsou zde vidět hrubší struktura.

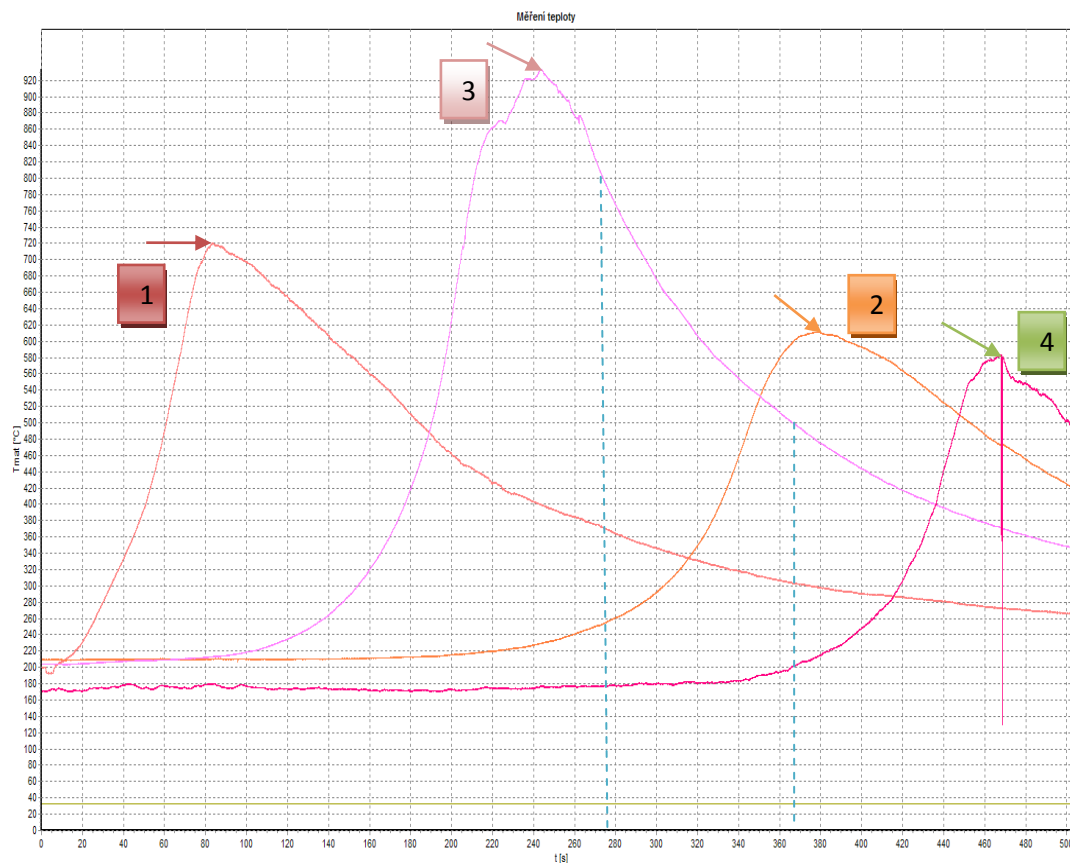


Obr. 3.24: Makrostruktura s vyznačenou svarovou lázní - výbrus č. 1/82



Obr. 3.25: Makrostruktura s vyznačenou svarovou lázní - výbrus č. 2/82

➤ *Teplotní průběh* - Na obr. 3.26 jsou čísla označeny termočlánky a šipkami znázorněny jejich maxima teplot. Termočlánky č. 3 a 4 byly v maximálních teplotách rušeny. Modrá čárkovaná čára značí teploty při chladnutí 800°C respektive 500°C v čase pro termočlánek č. 3. Hodnoty termočláneků jsou uvedeny v tab. 3.8.



Obr. 3.26: Průběh teplot na termočláncích

Tab. 3.8: Hodnoty pro termočlánky 1-4

Termočlánky	Max. teplota [°C]	Dosažení 800°C [s]	Dosažení 500°C [s]	$\Delta t_{8/5}$ [s]
1	720	/	/	/
2	1150	/	/	/
3	610	276	366	90
4	580	/	/	/

3.3.3 Svar č. 3

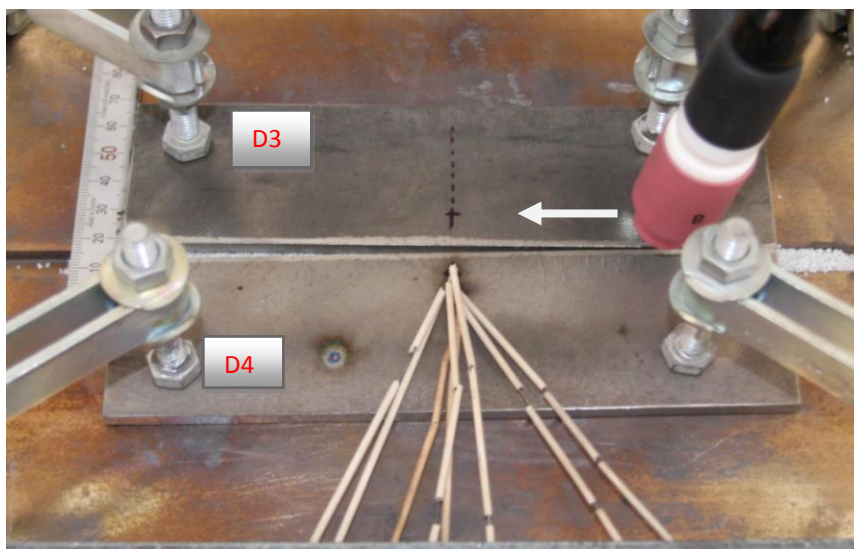
Svar č. 3 se skládá ze vzorků s označením D3 a D4. Tyto vzorky byly upnuty na vyhřívané nerezové desce (obr. 3.27). Vzorek D4 byl upnut na pevně, vzorek D3 byl pevně upnut v jednom místě, aby mohlo dojít ke stažení vzorků v průběhu svařování. Tab. 3.9 uvádí rozměry svařovaných vzorků, označení v programu WeldMonitor 3.5 a tab. 3.10 počáteční parametry svařování. Průměr elektrody WT 20 pro svařování byl zvolen 3,2 mm a bylo také použito hubice se sítkem pro lepší ochranu svarové lázně. Ochranným plynem byl Argon 4,8. Vzorek D3 byl opatřen čtyřmi termočládky pro zaznamenání teploty v ose ve vzdálenosti 90 mm od pravé hrany vzorku a od horní hrany byly vzdálenosti termočládků následující: 6, 10, 12, 15 mm. Rozevření obou vzorků na konci činilo 6 mm.

Tab. 3.9: Označení a rozměry vzorků

Označení vzorku	Rozměry [mm]	Číslo svaru ve WeldMonitoru 3.5
D3	180x50x5	83
D4	180x50x5	

Tab. 3.10: Počáteční parametry svařování

Rychlost svařování [mm/s]	DC - I [A]	Průtok plynu [l/min]	Teplota předehřevu [°C]
0,375	100	13,5	200

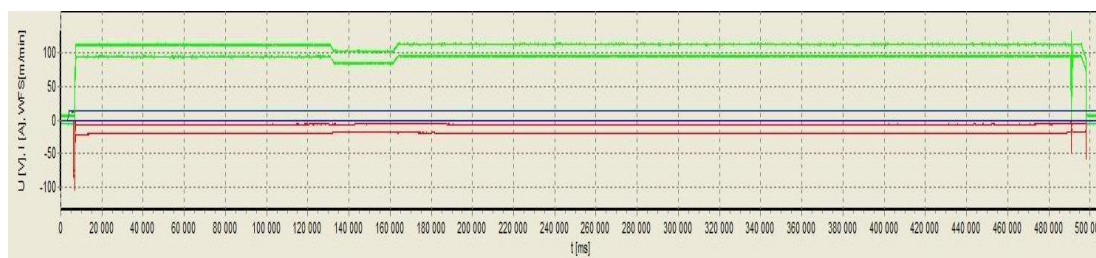


Pozn. šipka znázorňuje směr svařování a pořadí termočládků je shora 1,2,3,4

Obr. 3.27: Upnuté vzorky D3 + D4 s přivařenými termočládky

3.3.3.1 Průběh svařování

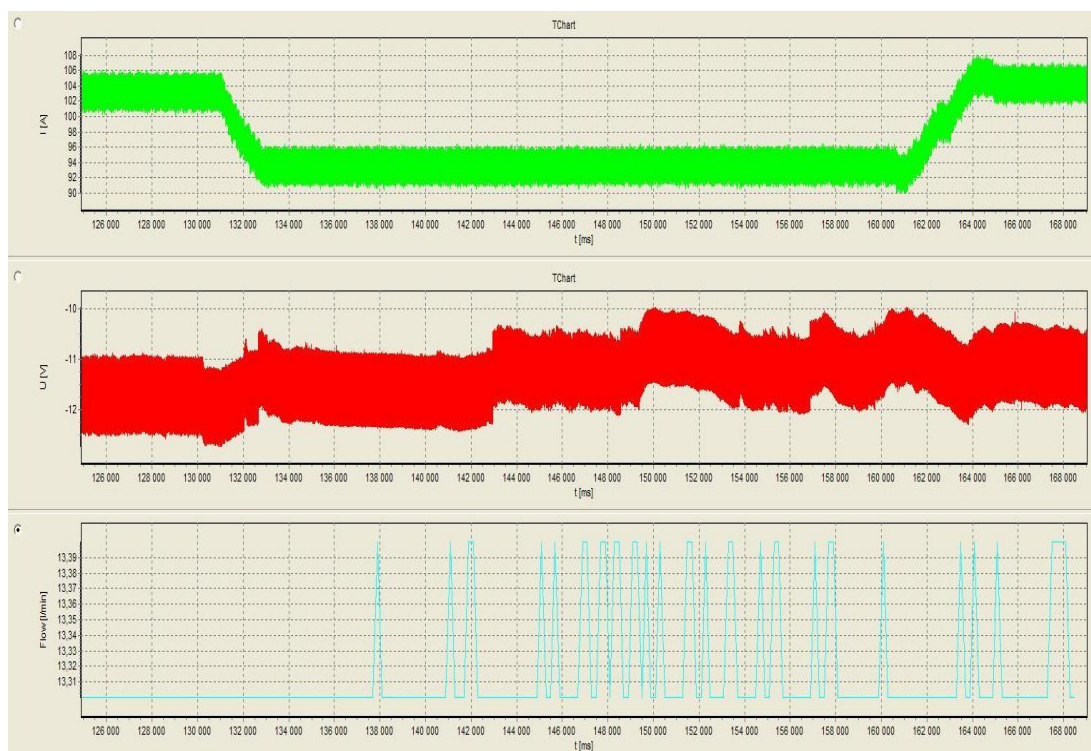
Zapnutí snímacích zařízení odpovídá čas $t = 0$ s. Začátek svařování byl po necelých 7,1 sekundách (*obr. 3.29*), rozjezd dráhy nastal v čase $t = 24,2$ s. Po 131 sekundách od začátku měření následovalo krátkodobé snížení proudu ze 100 A na 90A, protože se objevily v místě svařování nečistoty z materiálu a to znesnadnilo na krátkou dobu svařování, po 30 sekundách se znovu proud zvýšil na původní hodnotu 100 A a to v čase $t = 161$ s (*obr. 3.30*). V čase měření $t = 490$ s došlo k přerušení svařování a k jeho opětovnému započetí a to vše během 1 sekundy. Po dalších 4 sekundách došlo k ukončení svařování a stalo se tak v čase $t = 498$ s (*obr. 3.31*). Celkový průběh svařování je na *obr. 3.28*. Ihned poté se svařený vzorek vložil do pece vyhřáté na 700°C a zde se ponechal 4 hodiny na výdrži při této teplotě s následným ochlazováním až do jeho úplného vychladnutí za 21 hodin. Během svařování došlo k poškození termočlánku č. 1. Celková doba svařování byla 491s.



Obr. 3.28: Celkový průběh svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.29: Detail startu svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.30: Detail snížení a následného vrácení proudu na 100 A zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.31: Detail výpadku a ukončení svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5

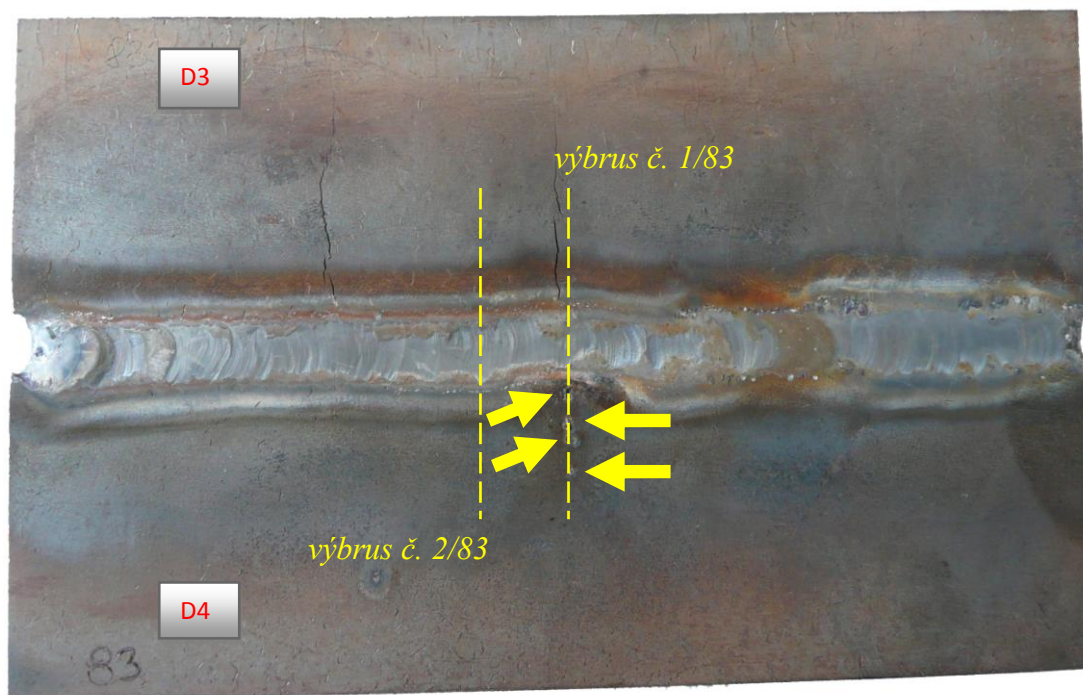
3.3.3.2 Zhodnocení svařeného vzorku

➤ *Určení vneseného tepla* – Řídilo se výše uvedenou rovnicí (3.1), hodnoty vneseného tepla pro použité parametry jsou uvedeny v *tab. 3.11*.

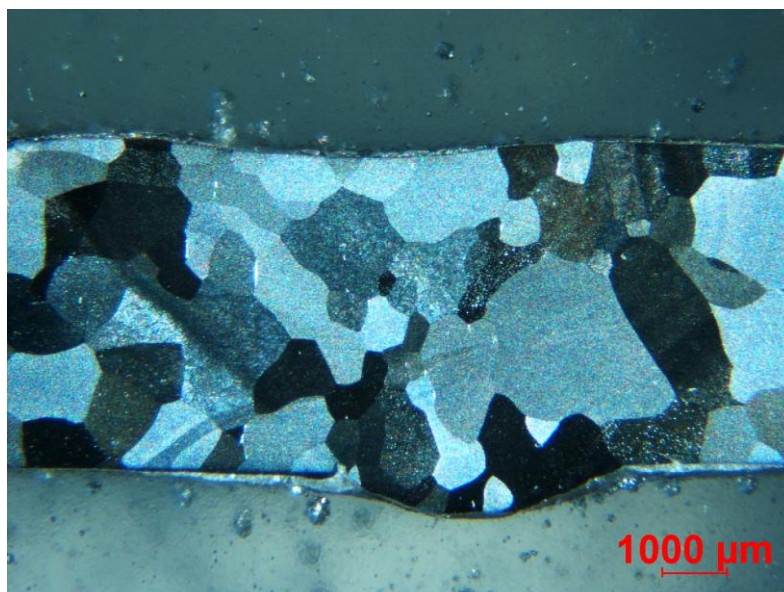
Tab. 3.11: Hodnoty vneseného tepla

	Start		Změna 1		Změna 2	
$v_s = 0,375$ [mm/s]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]
$\eta = 0,6$	100	13,1	90	12,3	100	12,9
Q [kJ/mm]	2,096		1,771		2,064	

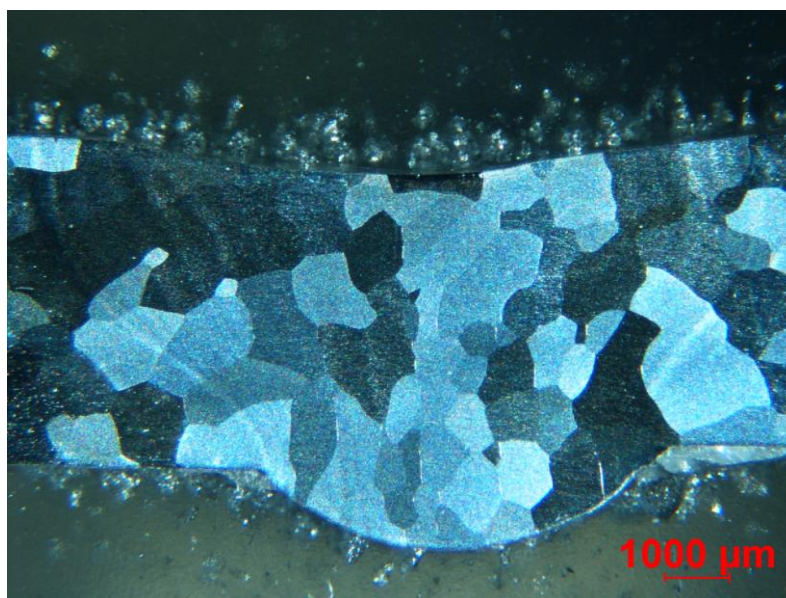
➤ *Výbrusy svařeného vzorku* - Na *obr. 3.32* jsou šipkami znázorněna umístění termočlánků a čárkovanými čarami jsou znázorněna místa řezů pro metalografické výbrusy (*obr. 3.33 a obr. 3.34*). Trhliny, které jsou vidět na *obr. 3.32*, nevznikly v důsledku svaření obou vzorků, ale byly v materiálu obsaženy již před svařením. Je i zřejmé, že tyto trhliny nezasahují do svaru. Také je zde vidět místo, ve kterém se objevily nečistoty, které znesnadnily svařování.



Obr. 3.32: Svařené vzorky D3 + D4 (83)



Obr. 3.33: Makrostruktura svaru - výbrus č. 1/83

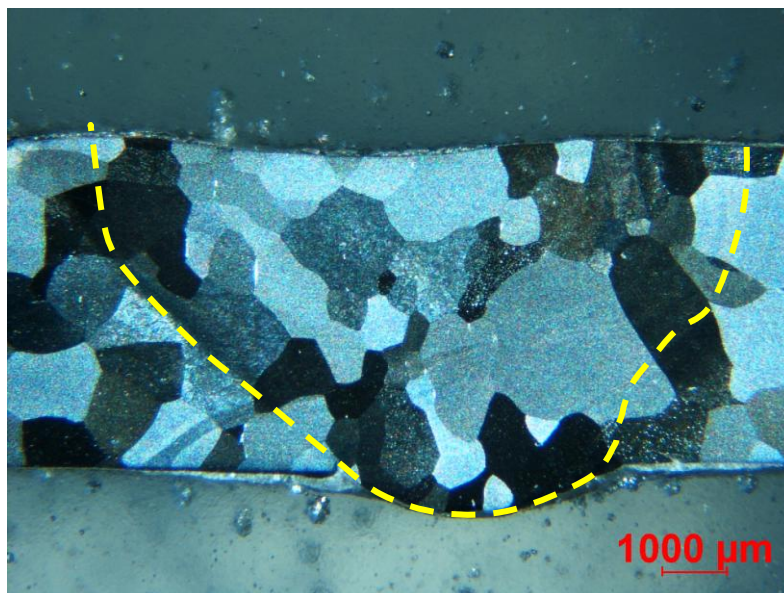


Obr. 3.34: Makrostruktura svaru - výbrus č. 2/83

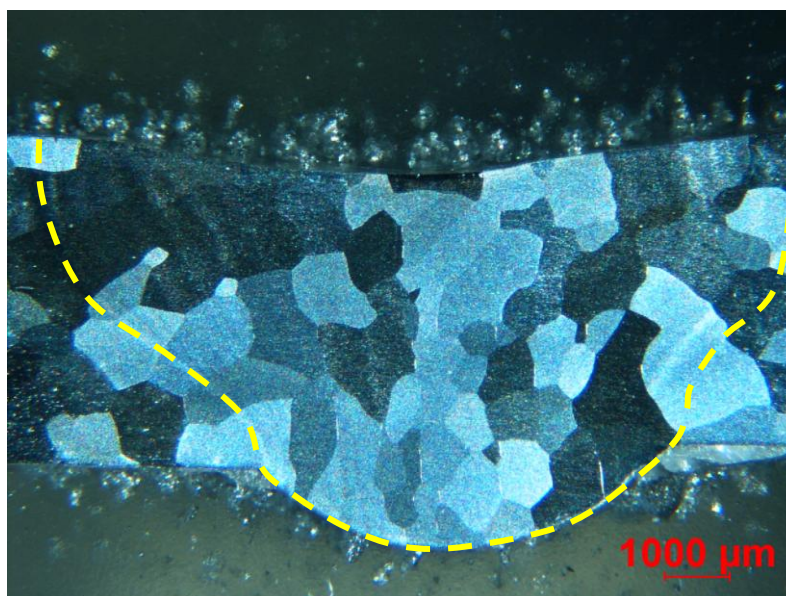
Na *obr. 3.33* je vidět, že se povedlo provařit vzorek v tomto místě pouze z jedné části a to z důvodu umístění azbestové krytky na termočlánky. Toto ovlivnění svaru je vidět i na *obr. 3.32* v místě umístění termočlánků. Také je viditelný proláklý povrch svaru. Struktura je v místě svaru téměř shodná se strukturou tepelně ovlivněné oblasti. U výbrusu č. 2/83 se povedlo provaření, svar je symetrický, struktura v kořeni svaru je jemnější než ve zbytku svaru a tepelně ovlivněné oblasti, ale je zde

velmi proláklý povrch svaru (obr. 3.34). Ani u jednoho ze vzorků nejsou další viditelné vady.

➤ *Určení tvaru svarové lázně* – Na obr. 3.35 a obr. 3.36 jsou žlutými čarami znázorněny hranice svarové lázně. Určení této hranice u výbrusu č. 1/83 bylo složité, protože zde není viditelný přechod struktury. U výbrusu č. 2/83 je alespoň viditelná hranice, která by měla odpovídat vyznačené hranici ztavení.

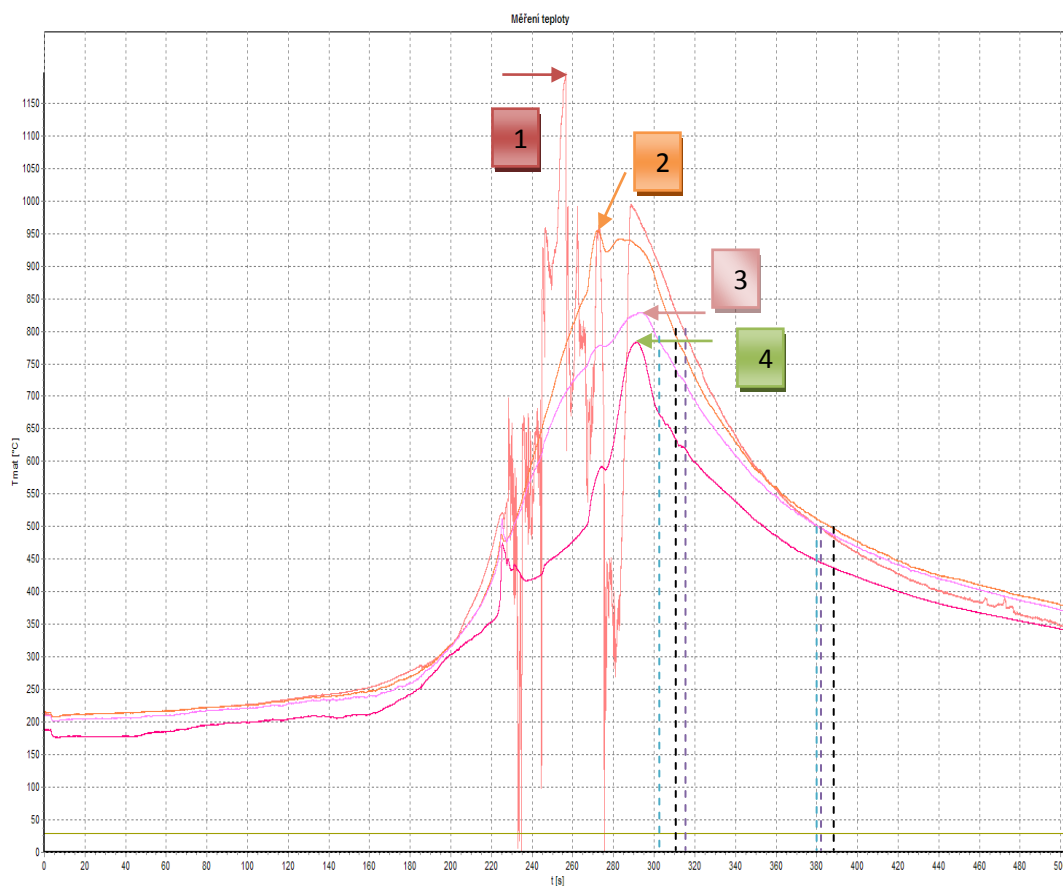


Obr. 3.35: Makrostruktura s vyznačenou svarovou lázní - výbrus č. 1/83



Obr. 3.36: Makrostruktura s vyznačenou svarovou lázní - výbrus č. 2/83

➤ *Teplotní průběh* - Na obr. 3.37 jsou čísla označeny termočlánky a šipkami znázorněny jejich maxima teplot. Při tomto měření byly termočlánky č. 1, 2 a 4 rušeny. Čárkované čáry značí teploty při chladnutí 800°C respektive 500°C v čase pro termočlánky č. 1 (fialová), č. 2 (černá) a č. 3 (modrá). Hodnoty termočlánků jsou uvedeny v tab. 3.12.



Obr. 3.37: Průběh teplot na termočláncích

Tab. 3.12: Hodnoty pro termočlánky 1-4

Termočlánky	Max. teplota [°C]	Dosažení 800°C [s]	Dosažení 500°C [s]	$\Delta t_{8/5}$ [s]
1	1200	314	380	66
2	960	309	386	77
3	830	300	378	78
4	780	/	/	/

3.3.4 Svar č. 4

Svar č. 4 se skládá ze vzorků s označením E1 a E2. Tyto vzorky byly upnuty na vyhřívané nerezové desce. Vzorek E1 byl upnut na pevně, zatímco vzorek E2 byl upnut v jednom bodě a byl volný v místě rozevření, aby mohlo dojít ke stažení obou svařovaných vzorků. *Tab. 3.13* uvádí rozměry svařovaných vzorků, označení v programu WeldMonitor 3.5 a *tab. 3.14* počáteční parametry svařování. Průměr elektrody WT 20 pro svařování byl zvolen 3,2 mm a bylo také použito hubice se sítkem pro lepší ochranu svarové lázně. Ochranným plynem byl Argon 4,8. Vzorek E1 byl opatřen čtyřmi termočládky pro zaznamenání teploty v ose, která byla ve vzdálenosti 90 mm od pravé hrany vzorku a od horní hrany byly vzdálenosti termočládků pro č. 1, č. 2, č. 3 a č. 4 následující: 7, 11, 14 a 18 mm. Rozevření obou vzorků na konci činilo 5 mm.

Tab. 3.13: Označení a rozměry vzorků

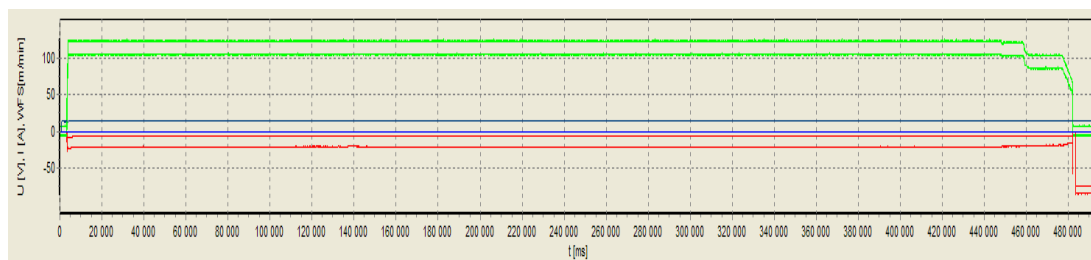
Označení vzorku	Rozměry [mm]	Číslo svaru ve WeldMonitoru 3.5
E1	180x60x5	86
E2	180x60x5	

Tab. 3.14: Počáteční parametry svařování

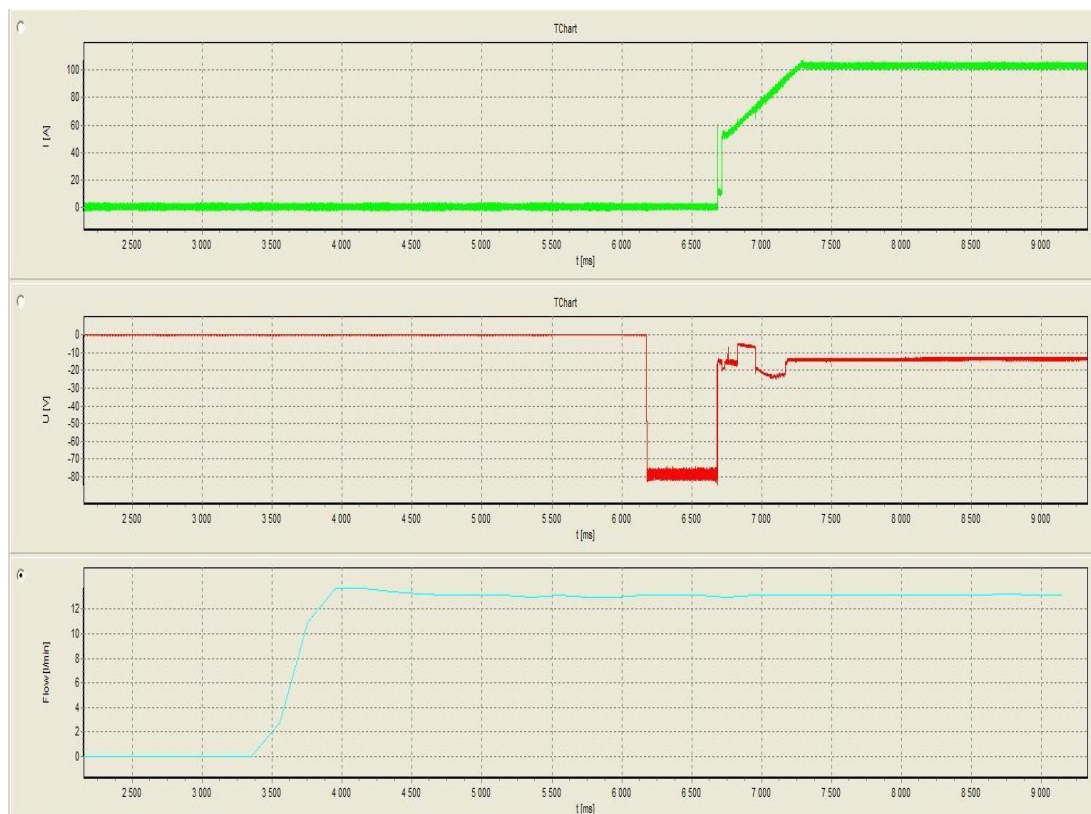
Rychlost svařování [mm/s]	DC - I [A]	Průtok plynu [l/min]	Teplota předehřevu [°C]
0,375	110	14	200

3.3.4.1 Průběh svařování

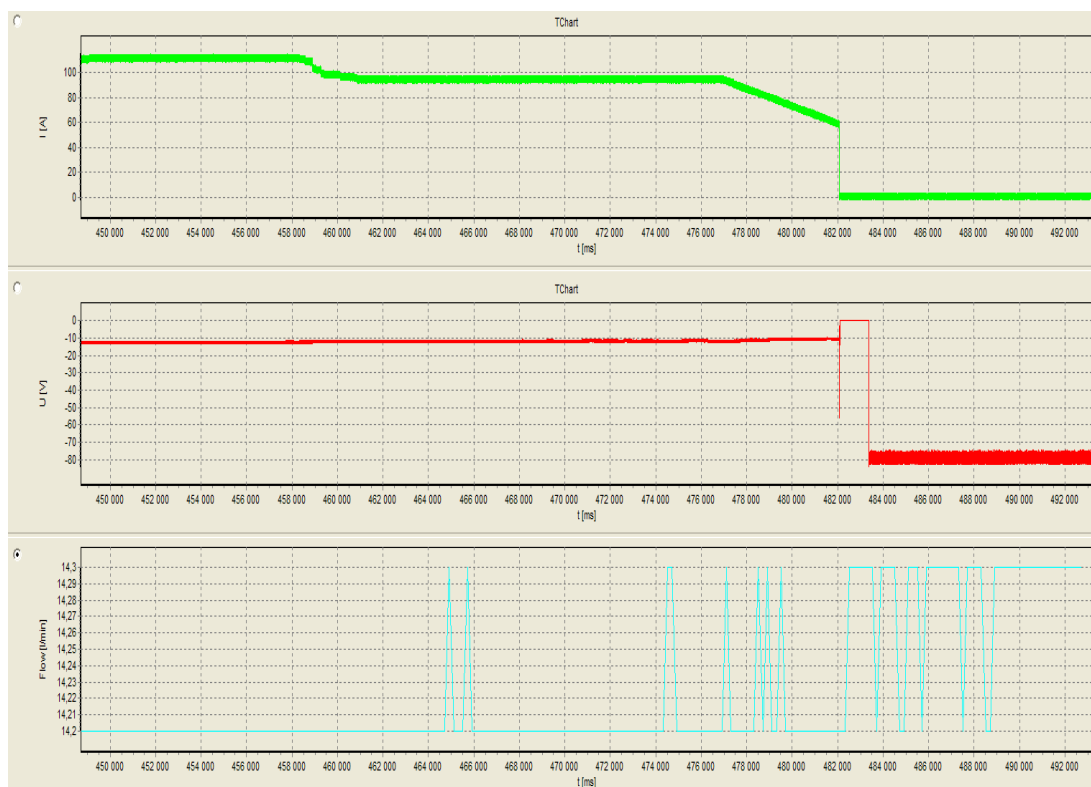
Zapnutí snímacích zařízení odpovídá čas $t = 0$ s. Začátek svařování byl po necelých 4 sekundách (*obr. 3.39*), rozjezd dráhy nastal v čase $t = 17$ s. Po 455 sekundách svařování přišlo snížení proudu ze 110 A na 90A, protože se blížil konec svařování, po dalších 33 sekundách došlo k jeho ukončení (*obr. 3.40*), to v čase $t = 492$ s. Celkový průběh svařování je na *obr. 3.38*. Ihned poté se svařený vzorek vložil do pece vyhřáté na 700°C a zde se ponechal 4 hodiny na výdrži při této teplotě s následným ochlazováním až do jeho úplného vychladnutí za 21 hodin. Celková doba svařování byla 488s.



Obr. 3.38: Celkový průběh svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.39: Detail startu svařování zaznamenaný programem WeldMonitor 3.5



Obr. 3.40: Detail Snížení proudu na 90 A následné ukončení svařování zaznamenané programem WeldMonitor 3.5

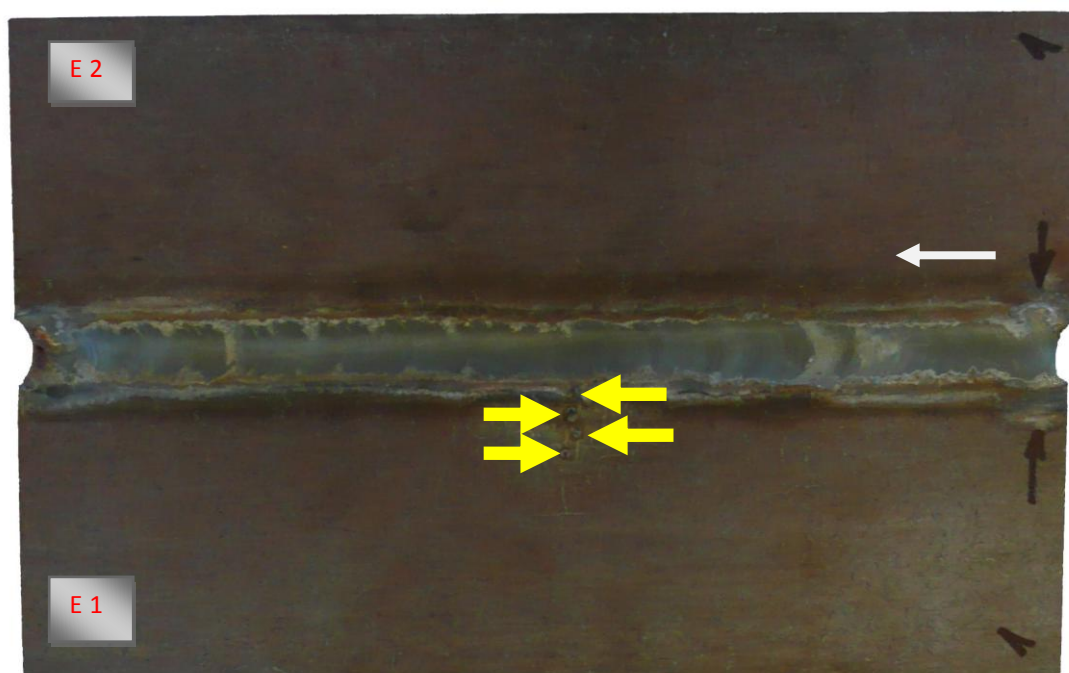
3.3.4.2 Zhodnocení svařného vzorku

➤ *Určení vneseného tepla* – Řídilo se výše uvedenou rovnicí (3.1), hodnoty vneseného tepla pro použité parametry jsou uvedeny v *tab. 3.15*.

Tab. 3.15: Hodnoty vneseného tepla

	Start		Změna 1	
$v_s = 0,375$ [mm/s]	I [A]	U [V]	I [A]	U [V]
$\eta = 0,6$	110	13,8	90	12,8
Q [kJ/mm]	2,428		1,843	

➤ *Svařený vzorek* – U toho vzorku se neprováděl metalografický výbrus, protože měl být využit pro měření povrchového napětí v Ostravě. Na tomto vzorku je vidět, že svarová lázeň měla během svařování téměř konstantní šířku a povedlo se také eliminovat vznik kráteru na konci svaru. Na *obr. 3.42* je zase vidět, že se povedlo dobře provařit vzorek po celé jeho délce.



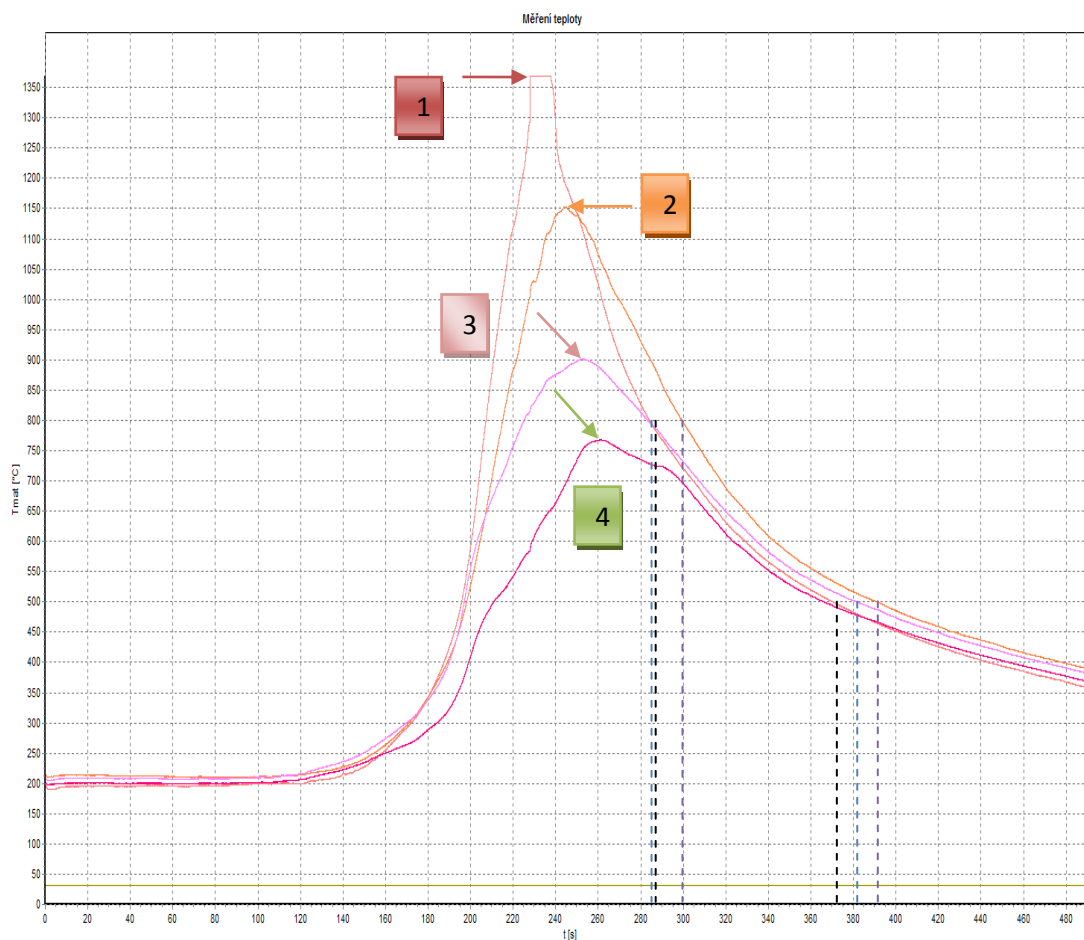
Pozn. žluté šipky znázorňují umístění termočlánků a bílá směr svařování

Obr. 3.41: Svařené vzorky E1 + E2 (86)



Obr. 3.42: Svařené vzorky E1 + E2 (86) – pohled na kořen svaru

➤ *Teplotní průběh* - Na obr. 3.43 jsou čísla označeny termočlánky a šipkami znázorněny jejich maxima teplot. Čárkované čáry značí teploty při chladnutí 800°C respektive 500°C v čase pro termočlánky č. 1 (černá), č. 2 (fialová) a č. 3 (modrá). Hodnoty termočlánků jsou uvedeny v tab. 3.16.



Obr. 3.43: Průběh teplot na termočláncích

Tab. 3.16: Hodnoty pro termočlánky 1-4

Termočlánky	Max. teplota [°C]	Dosažení 800°C [s]	Dosažení 500°C [s]	$\Delta t_{8/5}$ [s]
1	1370	285	370	85
2	1150	300	387	87
3	900	283	380	97
4	770	/	/	/

4 Závěr

Tato diplomová práce navazuje svým obsahem na výzkumné práce realizované v předchozích letech na katedře strojírenské metalurgie TU v Liberci. Základní materiál typu Fe_3Al byl připraven v rámci řešení grantu GAČR č. 106/07/1288. Práce je zaměřena na realizaci zkušebních tupých svarů metodou 141 bez přídavného materiálu na nově připraveném svařovacím pracovišti. Svařovací pracoviště je vybaveno monitorovacím zařízením WeldMonitor 3.5. Pro všechny zhotovené svary je k dispozici záznam časových průběhů základních veličin svařovacího procesu.

Funkčnost nového svařovacího pracoviště byla ověřena v rámci jiné diplomové práce (pana Jindřicha Tauchmana). Výsledky provedených zkušebních svarů byly podkladem pro návrh experimentů a jejich provedení v mé práci. Základním kritériem pro posuzování kvality svaru byla jeho celistvost, tj. cílem bylo realizovat svary bez trhlin.

Při vypracování experimentálního programu byly svařeny 4 vzorky s různými svařovacími parametry. Kvalita svaru byla hodnocena vizuální kontrolou a metalografickým rozbořem. Ze svařených vzorků se zhotovilo celkem pět metalografických výbrusů, u kterých se zjišťovala struktura a tvar svarové lázně, jako podklad pro simulační výpočty v programu SYSWELD. Pro stejné účely se zjišťovaly i průběhy teploty v ovlivněném pásmu svaru termočlánky NiCr – Ni v přesně zaměřených místech. Při měření průběhu teplot došlo v některých případech k poškození termočlánků, nebo porušení spoje se základním materiálem. Z naměřených svařovacích parametrů se podle výpisu parametrů určovala hodnota vneseného tepla při svařování jednotlivých vzorků.

Výsledky experimentů potvrdily možnost přípravy svarů bez trhlin za použité technologie a parametrů svařování. Ani u jednoho vzorku se neobjevily trhliny zapříčiněné svařováním, ať už byl použit předehřev 200°C nebo 400°C . Povrchy většiny svarů jsou proláklé, neboť se svary zhotovovaly bez přídavného materiálu. Struktura na jednotlivých výbrusech není v celé ploše výbrusu příliš rozdílná a stanovení obrysu svarové lázně bylo velmi obtížné a subjektivní. Přesně bylo možno určit jenom okraje svaru a profil v oblasti kořene.

Pro další experimentální práce doporučuji ověřit jiné možnosti pro určení geometrie svarové lázně a zajistit spolehlivější spoje termočlánků se základním materiálem. Také by bylo účelné z realizovaných spojů připravit tělesa pro mechanické zkoušky svarů a získat tak další kritéria pro posuzování kvality svarových spojů.

5 Seznam použité literatury

- [1] www.quido.cz (duben 2009)
- [2] www.svarbazar.cz (únor 2009)
- [3] www.twi.co.uk (únor 2009)
- [4] Kolektiv autorů: *Technologie svařování a zařízení - učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*, 1.vyd. Vydalo nakladatelství ZEROS v Ostravě v edici svařování, Ostrava, srpen 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [5] www.shop.migatronic.cz (únor 2009)
- [6] www.stellite.de (duben 2009)
- [7] www.minitruckinweb.com (duben 2009)
- [8] McKAMEY, C.G.: Iron aluminides, in physical metalurgy and processing of intermetallic compounds, eds. Stoloff N.S., Sikka V.K., 1994, 351-391
- [9] ŠEDIVÁ, I. *Vlastnosti slitiny Fe₂₈Al₄Cr z hlediska použití za vysokých teplot.* [s.l.], 2003. 89 s. TU v Liberci, Fakulta strojní. Dizertační práce.
- [10] NEUMANN, H.: Ověření svařitelnosti Fe₃Al./ Zpráva H.S. č. 2706/2200/.2004, 30 s. TU v Liberci, Fakulta strojní.
- [11] www.electric.cz (březen 2009)
- [12] ČSN EN ISO 5817
- [13] ČSN EN 1011-1

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím práce a konzultantem.

Datum 5. 6. 2009

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No.121/2000 Coll applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date 5. 6. 2009

Signature